INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2022 · nº 548 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LOS ORÍGENES DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO

¿Surge el espaciotiempo de una realidad más fundamental?

MEDIOAMBIENTE Beneficios de reciclar la orina

FÍSICA MATEMÁTICA ¿Fluidos que actúan como superordenadores?

EVOLUCIÓN El enigma de los genomas gigantes

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

IMAGEN DE PORTADA: STEFANIA INFANTE

APUNTES



Un sistema de inteligencia artificial aprendió a compartir la carretera (y a ganar) en el videojuego *Gran Turismo Sport*.

CAMPEONES AUTOMÁTICOS

Los pilotos digitales triunfan en un realista juego de carreras

Para tomar una curva por la trazada más rápida sin perder el control, los pilotos de carreras deben ejecutar una secuencia de acciones calculadas con precisión: frenar, girar el volante y acelerar. El proceso depende de los límites de fricción, que se rigen por leyes físicas conocidas. Y los vehículos autónomos pueden programarse para que, en función de esas leyes, circulen lo más rápido posible. Sin embargo, la cosa se complica cuando el piloto automatizado ha de compartir el espacio con otros coches. Un equipo de científicos ha solucionado el problema en el mundo virtual, entrenando un algoritmo de inteligencia artificial (IA) para que logre vencer a competidores humanos en *Gran Turismo Sport*, un videojuego de carreras de extraordinario realismo. Los resultados podrían aportar valiosa información para el diseño de vehículos autónomos.

La inteligencia artificial ya ha derrotado a jugadores humanos en algunos videojuegos, como *Starcraft II* y *Dota 2*. No obstante, *Gran Turismo Sport* presenta diferencias significativas, repara Peter Wurman, director de Sony AI (la división de IA de Sony) en Norteamérica y coautor del nuevo estudio, publicado en *Nature*. «En la mayoría de los juegos, el entorno define las reglas y protege a cada usuario del resto», explica. «Sin embargo, en una carrera, los coches se encuentran muy cerca unos de otros y existe un protocolo muy elaborado que debe enseñarse a los pilotos automatizados. Para ganar, han de tener respeto por sus rivales, pero también deben mantener su trazada y evitar los adelantamientos.»

Los investigadores de Sony AI enseñaron al programa los pormenores del juego mediante una técnica denominada aprendizaje por refuerzo profundo. Los científicos «recompensaban» al algoritmo por determinados comportamientos, como no salirse de la pista, mantener el control del vehículo y respetar las normas de la competición (evitar los choques, por ejemplo). Después, dejaron que el programa lograra esos objetivos por sí mismo. Así, desarrollaron distintas versiones de la IA, llamada Gran Turismo Sophy (GT Sophy), de forma que cada una aprendió a conducir un coche específico en un circuito concreto. A continuación, los investigadores midieron las fuerzas de algunas de esas versiones con campeones humanos de *Gran Turismo Sport*.

En la primera prueba, que tuvo lugar el pasado mes de julio, las personas obtuvieron la mayor puntuación global por equipos. En la segunda, realizada en octubre de 2021, triunfaron las versiones de la IA, que lograron las vueltas más rápidas y vencieron como equipo a sus rivales humanos, además de ganar cada una de las carreras.

Los jugadores humanos parecieron tomarse la derrota con filosofía e incluso disfrutaron compitiendo contra la IA. «Algunos pilotos nos dijeron que habían aprendido cosas nuevas gracias a las maniobras de Sophy», comenta Erica Kato Marcus, directora de estrategia y colaboración de Sony AI.

«Las trazadas que seguía la IA eran muy arriesgadas. Yo quizá podría tomarlas una vez, pero me parecían tan complicadas que nunca lo intentaría en una carrera», señala Emily Jones, que en 2020 fue finalista mundial en el Campeonato de Gran Turismo (competición certificada por la Federación Internacional del Automóvil) y más tarde corrió contra GT Sophy. Aunque Jones admite que se sintió algo impotente al competir contra la IA, describe la experiencia como impresionante. «En automovilismo, como en muchos otros deportes, se trata de acercarse lo máximo posible a la vuelta perfecta aunque nunca llegues a alcanzarla», explica Jones. «Con Sophy, me pareció una locura presenciar la vuelta perfecta. Era imposible ir más rápido.»

El equipo de Sony continúa perfeccionando la IA y aspira incluso a desarrollar una versión que pueda competir con cualquier coche y en cualquier circuito del juego. También espera colaborar con los creadores de *Gran Turismo*

Sport para incorporar en futuras actualizaciones una versión menos invencible de la IA.

Dado que *Gran Turismo Sport* simula de forma realista los vehículos y circuitos del mundo real (así como los parámetros físicos específicos por los que se rigen), la reciente investigación podría aplicarse en otros ámbitos, más allá de los videojuegos. «Un aspecto interesante y que lo diferencia del juego *Dota* es que su entorno se basa en la física», opina Brooke Chan, ingeniera de *software* de la empresa OpenAI y coautora del proyecto OpenAI Five, que venció a los humanos en *Dota 2*. Cuando una IA se entrena para competir en *Gran Turismo Sport*, aprende a entender mejor el mundo físico, añade Chan, que no participó en el estudio de GT Sophy.

«*Gran Turismo Sport* es un simulador excelente: está ludificado en algunos sentidos, pero representa con fidelidad muchas de las diferencias que existen entre los distintos coches y circuitos», señala J. Christian Gerdes, ingeniero mecánico de la Universidad Stanford ajeno al estudio. «En mi opinión, esto es lo más parecido a publicar un artículo que demuestre que una IA es capaz de competir mano a mano con los seres humanos en un entorno automovilístico.»

No obstante, en una carretera física, la situación es muy distinta. «En el mundo real, hay que lidiar con elementos como ciclistas, peatones, animales, objetos caídos de camiones, el mal tiempo o las averías», advierte Steven Shladover, experto en automatización de vehículos de la Universidad de California en Berkeley que tampoco tomó parte en el estudio. «Nada de eso aparece en los juegos.»

Puesto que GT Sophy calcula la trayectoria más rápida sin descuidar la interacción con las personas, a menudo imprevisibles, sus logros podrían ser de utilidad en otros ámbitos donde cooperan seres humanos y sistemas automatizados, asegura Gerdes. Más allá de la conducción automatizada, esa capacidad podría facilitar algún día las interacciones que tienen lugar, por ejemplo, en la cirugía robótica o con los aparatos que ayudan en las tareas domésticas.

El éxito de GT Sophy también pone en entredicho ciertos supuestos sobre la forma en que se programan los coches autónomos, añade Gerdes. Un gran número de vehículos automatizados perfeccionan sus movimientos (como tomar una curva rápidamente sin derrapar) siguiendo las leyes físicas incorporadas en su programación, mientras que GT Sophy los optimizó gracias al entrenamiento de la IA.

«Creo que la conclusión que deben extraer los desarrolladores de vehículos autónomos es que quizás haya que revisar algunas de nuestras ideas preconcebidas, como que ciertas cuestiones se resuelven mejor aplicando la física», concluye Gerdes. «La inteligencia artificial también podría resultar útil en ese sentido.»

Sophie Bushwick



SONY INTERACTIVE ENTERTAINMENT

Dos coches compitiendo en *Gran Turismo Sport*.

ECOLOGÍA

BOSQUES OCULTOS

La ciencia desconoce miles de especies arbóreas

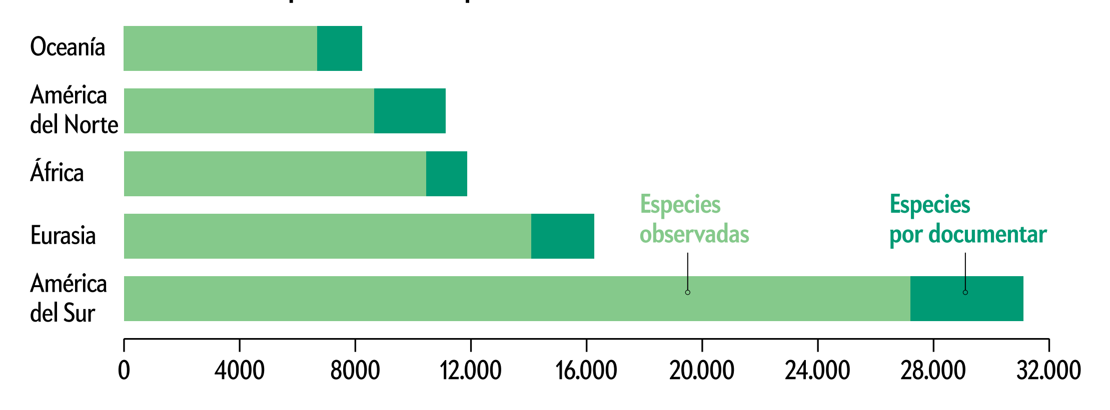
Los bosques de nuestro planeta podrían encerrar más secretos de los que se pensaba. Una nueva estimación de la biodiversidad arbórea mundial sugiere que quedan por descubrir unas 9200 especies de árboles. Y la mayoría de ellas se encontraría en los trópicos, según el reciente estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Pasar por alto la presencia de árboles parece difícil, pero también lo es cuantificarlos y, a veces, incluso identificarlos. «Sus copas alcanzan decenas de metros de altura, se intercalan entre otros elementos del paisaje y unas especies se parecen a otras», explica Miles Silman, biólogo conservacionista de la Universidad Wake Forest que no participó en el estudio. «Las personas que se pasan meses enteros en la naturaleza, observando cada árbol, pertenecen a una estirpe poco común.»

La investigación se basó en el trabajo realizado por centenares de personas de todo el planeta pertenecientes a esa rara estirpe. Esos colaboradores catalogaron los árboles en dos enormes bases de datos. La primera, asociada a la Iniciativa Global de Biodiversidad Forestal, registra todas las especies halladas en parcelas forestales bien documentadas de todo el mundo. La segunda, llamada TREECHANGE, recopila las observaciones de especies individuales. En conjunto, los datos indican que existen unas 64.100 especies de árboles registradas en el mundo, un valor superior a las estimaciones previas, que rondaban las 60.000 especies.

Los investigadores extrapolaron el número de especies raras que ya figuraban en las bases de datos y calcularon que aún quedan por documentar 9200 especies. La mayoría de ellas podrían definirse como raras, pues radican en áreas geográficas pequeñas y su número es reducido, afirma Jingjing Liang, ecólogo forestal de la Universidad Purdue y coautor del artículo. La cifra obtenida por el equipo es «un cálculo bastante conservador», admite Liang, ya que los científicos no saben demasiado sobre la preponderancia de especies poco comunes en regiones como el Amazonas, donde pueden existir zonas recónditas que alberguen especies inusuales no observadas en otros lugares. «Si pudiéramos concentrar los recursos, es decir, la financiación y nuestra experiencia en la elaboración de inventarios forestales, en las selvas tropicales del Amazonas y de Borneo», añade Liang, «podríamos obtener estimaciones más fiables».

Silman cree que el estudio podría subestimar el número real de especies no documentadas. Las inspecciones a escala local que ha realizado junto a sus colaboradores apuntan a que, solo en la cuenca del Amazonas, existen al menos 3000 especies desconocidas (y posiblemente más de 6000). El biólogo subraya que los árboles se clasifican a menudo según



FUENTE: «THE NUMBER OF TREE SPECIES ON EARTH», POR ROBERTO CAZZOLLA GATTI ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES*, VOL. 119, ART. E2115329119, ENERO DE 2022; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

su aspecto, por lo que las nuevas técnicas de análisis genético podrían poner de manifiesto una mayor biodiversidad.

Drew Kerkhoff, biólogo del Colegio Kenyon que tampoco intervino en el estudio, se pregunta cuántas especies se extinguirán antes de que los científicos tengan la oportunidad de describirlas. «Por otro lado, ¿cuántas conocerán ya los pueblos indígenas de las cuencas del Amazonas o del Congo, o cuántas conocieron los pueblos y culturas que han desaparecido a causa de la colonización, las enfermedades, los genocidios o la asimilación cultural? ¿De cuántas especies se guardan muestras secas en las vitrinas de los herbolarios?»

Según Kerkhoff, la búsqueda de las nuevas especies ayudará tanto a la comunidad conservacionista como a los científicos evolutivos a entender las causas y los mecanismos de la diversificación y extinción de especies. «El simple hecho de que aún queden por descubrir miles de especies de algo tan común como los árboles me parece inspirador.»

Stephanie Pappas

BIOLOGÍA

MOSQUITOS A LA CAZA DEL COLOR

Una vez que detectan el CO_2, los insectos buscan tonos rojos y anaranjados

Un mosquito hambriento es capaz de percibir el dióxido de carbono que exhala una persona a 30 metros de distancia. Ahora, una nueva investigación indica que el gas activa su sentido de la vista en busca de los tonos de la piel humana.

«El olor le dice que hay algo por ahí, pero acaba localizándolo con la visión», explica el neurobiólogo de la Universidad de Washington Jeff Riffell, autor principal del estudio, publicado en *Nature Communications*. Tras analizar 1,3 millones de trayectorias de vuelo, su equipo descubrió que a este insecto díptero le atrae el rojo y el naranja claro (que refleja la piel humana de cualquier raza) y pasa de largo de los verdes y los azules, aunque solo en presencia de CO_2.



JOAO PAULO BURINI/GETTY IMAGES

Aedes aegypti **puede ser portador de los virus del dengue y del Zika.**

Observar los mosquitos no es nada sencillo, pues revolotean de aquí para allá en trayectorias al azar. Se les suele estudiar encerrados en cajas pequeñas, pero «distan mucho de ser las condiciones naturales», aclara Riffell. A fin de simular un entorno más realista, su equipo construyó un túnel de viento de un metro de largo donde podían controlar con suma precisión la velocidad del viento, los olores y los estímulos visuales. A lo largo del túnel, 16 cámaras captaban imágenes, que una vez unidas plasmaban la trayectoria de vuelo completa de cada mosquito.

Cuando se sueltan ejemplares de *Aedes aegypti* en el túnel, estos no investigan los objetos de color similar a la piel humana hasta que no se añade el dióxido de carbono. Cuando esto sucede, vuelan en tropel hacia los objetos; si se filtra la luz naranja y roja, la atracción cesa.

En otro experimento, los investigadores introdujeron mutaciones en los fotorreceptores del mosquito para cegar la visión de las longitudes de onda largas, como las de la luz roja. Esto también detuvo su vuelo a los tonos de la piel humana, al igual que las mutaciones del receptor que detecta el CO_2.

«Los mosquitos no poseen un receptor independiente que identifique el rojo», afirma Almut Kelber, biólogo de los sentidos de la Universidad de Lund que no ha participado en el estudio. Parece probable «que vean el naranja, el rojo y el negro como tonos oscuros, y que la elección del rojo sea por defecto, "al no ser ni verde ni azul"».

Otros insectos también usan primero el sentido del olfato antes de afinar la vista. Las hembras de la mariposa *Papilio xuthus*, por ejemplo, «eligen el color en función del olor», explica Kelber. En un entorno de laboratorio sin aromas, se posan preferentemente en los objetos azules. Pero cuando huelen una planta en la que poner los huevos que sirva de alimento para las futuras larvas, se dirigen hacia el verde. Si huelen naranjas o lirios su preferencia vira al rojo.

Riffell pretende aplicar sus descubrimientos al diseño de trampas antimosquitos más eficaces. Muchas tienen componentes blancos, «y a los mosquitos no les gusta nada ese color».

Niko McCarty

BIOINGENIERÍA

EDICIÓN GÉNICA DESDE DENTRO

Se crea una nueva técnica de retoque génico basada en una herramienta bacteriana

En las profundidades de la matriz gelatinosa que constituye el medio interno de la bacteria residen unas diminutas «máquinas celulares» llamadas retrones, cuya misión es producir hebras monocatenarias de ADN que detectan ciertas infecciones víricas. Ahora, por primera vez, se han modificado genes en células humanas con esos guionistas naturales del ADN. Un estudio novedoso, publicado en *Nature Chemical Biology*, afirma que la técnica podría mejorar la edición génica en diversos grupos zoológicos.



IPOPBA/ISTOCK

Si bien la técnica CRISPR ha simplificado en gran medida la edición de los genes durante los últimos años, no está exenta de limitaciones, según Seth Shipman, bioingeniero de la Universidad de California en San Francisco (UCSF) y uno de los autores del estudio. En la técnica, se introduce la enzima Cas9 para cortar segmentos de ADN; y también se proporciona un molde del ADN deseado, diseñado por los investigadores, con el fin de que las células lo incorporen durante el proceso de reparación. Pero ese molde de ADN se crea en el

laboratorio y ha de ser insertado por separado de los componentes de CRISPR, y no siempre consigue atravesar la membrana celular.

Shipman y sus colaboradores usaron en su lugar retrones para fabricar ese ADN en el seno de la propia célula, que queda así directamente a disposición de CRISPR. Los retrones codifican una enzima llamada retrotranscriptasa que fabrica hebras de ADN a partir de ARN

También lucen «algunos bucles superpuestos de ARN» que facilitan su función, según Santiago López, estudiante de posgrado en la UCSF y autor principal del estudio.

El equipo modificó los retrones en el laboratorio para que produjesen el molde de ADN deseado y alargaron los bucles de ARN, un cambio que hizo que cada retrón produjese más copias de ADN. Por último, insertaron los retrones en las células junto con los componentes de CRISPR.

De ese modo, los retrones produjeron de 10 a 100 veces más moldes de ADN en las células de levadura que en las humanas. La edición de los retrones también resultó más precisa en las primeras que en las segundas, posiblemente debido a las diferencias en el número de hebras o al modo en que cada tipo de célula repara el ADN. «Pero, con franqueza, eso no nos preocupa ahora mismo, puesto que esto es solo un pequeño obstáculo», afirma Shipman. Asegura que con más ajustes y con la optimización se podrán editar con más precisión las células humanas.

«Si logramos reprogramar los retrones para que produzcan ADN como "donantes" dentro de las células de los pacientes, servirán como aplicaciones de terapia génica contra enfermedades como la anemia falciforme, que solo exige reparar pequeños tramos defectuosos en una secuencia génica», afirma el biólogo molecular de la Universidad de Nebraska Channabasavaiah B. Gurumurthy, ajeno al estudio.

Pero introducir ADN extraño en las células humanas podría «desencadenar respuestas inmunitarias perjudiciales que limitarían las modificaciones genéticas», advierte Jin-Soo Kim, director del Centro IBS de Ingeniería Genómica de Corea del Sur, también ajeno al trabajo. Los investigadores que solo emplean el CRISPR han elaborado procesos para suprimir tales respuestas, matiza Kim, pero está por ver cómo se pueden adaptar a los retrones.

Saugat Bolakhe

HÁPTICA

EMOJIS TÁCTILES

Una nueva técnica permite transmitir emociones simulando el contacto físico

THOMAS FUCHS

El distanciamiento durante la pandemia de COVID-19 hizo que los lazos físicos y sociales resultaran un poco más difíciles de mantener. Para Millie Salvato, estudiante de posgrado en la Universidad Stanford, estar separada de su novia, que vivía en la otra costa del país, supuso todo un desafío.

En ocasiones, un mensaje de texto o una videollamada se antoja insuficiente, y muchas personas en la situación de Salvato desearían disponer de un medio que les permitiera enviar una caricia o un abrazo reconfortante desde la distancia. En un estudio reciente publicado en *IEEE Transactions on Haptics*, Salvato y sus colaboradores presentan un dispositivo en forma de manga que, puesto en el brazo, es capaz de simular el contacto humano y transmitir mensajes sociales abstractos por vía electrónica.

«Se trata de un trabajo excepcional, que analiza cómo se manifiesta el contacto social y cómo reproducirlo», valora Gregory Gerling, experto en háptica de la Universidad de Virginia que no participó en el estudio.

Salvato y su equipo evaluaron la forma en que 37 participantes trasladaban información social en diferentes contextos. En cada experimento, una persona llevaba puesto un sensor

de presión en el brazo y otra lo tocaba en respuesta a situaciones concebidas para despertar seis reacciones emocionales distintas: búsqueda de atención, gratitud, felicidad, calma, amor y tristeza.

Tras registrar 661 gestos táctiles (como apretones, caricias, sacudidas o golpes con el dedo), Salvato y sus colaboradores identificaron en qué lugares y con qué presión se ejercía cada uno de ellos. A continuación, emplearon un algoritmo de aprendizaje automático para seleccionar los gestos que aparecían de manera más habitual con cada respuesta. Por último, programaron un dispositivo ponible con forma de manga que simula esos gestos, gracias a ocho discos incorporados que vibran al recibir una señal electrónica.

«No parece que te esté tocando una mano real», aclara Salvato, «pero tampoco notas un conjunto de movimientos sueltos e inconexos», como cabría esperar de unos discos móviles. «Es una sensación agradable, la verdad.»

Aun sin entrenamiento, un grupo formado por otros 30 participantes logró asociar los gestos simulados con las seis situaciones correspondientes en el 45 por ciento de los casos, 2,7 veces más que si hubieran respondido al azar. A modo de comparación, un estudio previo realizado en el laboratorio de Gerling concluyó que el porcentaje de acierto a partir del contacto de una mano real era de un 57 por ciento.

«Me parece interesante que los participantes puedan entender con una fiabilidad bastante alta el mensaje que se les ha transmitido, teniendo en cuenta la escasa información de la que disponen», comenta Gerling.

Anteriores investigaciones han puesto de manifiesto que el contacto social es importante para la salud física y mental. En el futuro, en vez de limitarnos a enviar un emoji a través del teléfono o el ordenador, tal vez podamos añadir un «emoji háptico» para sentirnos un poco más cerca de nuestros seres queridos.

Richard Sima

COGNICIÓN

APRENDER SIN PENSAR

Reducir el razonamiento puede facilitar el aprendizaje lingüístico

THOMAS FUCHS

Por razones que aún se desconocen, los niños suelen tener más facilidad para aprender idiomas que los adultos. Hay quien sostiene que comprender una lengua extranjera requiere asimilar de forma inconsciente ciertos patrones sutiles y que, en los adultos, el razonamiento consciente interfiere en ese proceso. Las últimas investigaciones sugieren que, en efecto, los adultos podrían ser más inteligentes de la cuenta.

En un estudio reciente publicado en *Journal of Experimental Psychology: General*, un grupo de adultos belgas debían leer y escuchar simultáneamente una serie de secuencias con cuatro palabras inventadas (por ejemplo, *kieng nief siet hiem*). Cuando una palabra contenía cierta vocal, también comenzaba y terminaba por consonantes concretas. A continuación, los participantes debían pronunciar esas secuencias en voz alta y con rapidez. Su capacidad para no cometer errores indicaba hasta qué punto habían asimilado los patrones consonante-vocal.

Sin embargo, antes de mostrarles las palabras inventadas, los participantes habían realizado un ejercicio que consistía en pulsar unas teclas al visualizar una serie de letras y números. Algunos de ellos se sometieron a una versión mucho más rápida y mentalmente agotadora de la prueba. Esos sujetos aseguraron haber sufrido una mayor fatiga cognitiva, pero luego obtuvieron mejores resultados en la tarea lingüística subsiguiente. Los investigadores presumen que las personas más cansadas no analizaban de

forma tan consciente las reglas de formación de las palabras: aprendían con menos restricciones, como los niños.

En un trabajo relacionado, publicado por el equipo en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, varios grupos de adultos angloparlantes debían escuchar secuencias de «palabras» inventadas de tres sílabas. Después, oían parejas de palabras de tres sílabas, en las que una provenía de la secuencia ya escuchada y la otra era una combinación nueva. Los participantes tenían que adivinar cuál de las dos habían oído antes y evaluar el grado de confianza de su respuesta.

En uno de los grupos, ciertos participantes habían realizado previamente la prueba de agotamiento mental. En otro, algunos habían recibido pulsos magnéticos para alterar la actividad del área cerebral que, según trabajos anteriores, está ligada al control ejecutivo. En ambos casos, las intervenciones mejoraron el porcentaje de acierto en el ejercicio de las sílabas cuando los participantes no estaban seguros de la respuesta, lo cual denota una retentiva inconsciente del discurso. (Por el contrario, las respuestas dadas con certeza estarían asociadas a un recuerdo consciente.)

Michael Ullman, neurocientífico de la Universidad de Georgetown que no colaboró en ninguno de los dos artículos, ve con buenos ojos que los estudios evaluaran el control cognitivo de manera distinta y midieran habilidades diferentes. «Es una buena manera de proceder, porque se obtienen pruebas convergentes», valora. Y añade que le gustaría que se aplicara ese enfoque al estudio de otras habilidades lingüísticas superiores, como la gramática.

Eleonore Smalle, psicóloga de la Universidad de Gante y primera autora de ambos artículos, nos brinda un consejo basado en los resultados obtenidos por su equipo. Al comenzar a aprender un nuevo idioma, dice, debemos sumergirnos en sus sonidos, incluso —o sobre todo— cuando estamos distraídos. «Tomarnos una buena copa de vino mientras escuchamos un *podcast* en italiano», sugiere entre risas. «¿Por qué no? Podría ayudar.»

Matthew Hutson

VIROLOGÍA

POLIZONES EN EL POLEN

Cientos de virus viajan gracias a la polinización

La brisa primaveral arrastra mucho más que polen. A semejanza de algunos virus humanos que se sirven de la reproducción humana para propagarse, los virus vegetales aprovechan el polen para viajar de una flor a otra. Un estudio publicado en *Nature Communications* revela que multitud de ellos viaja en el polen y advierte de que la actividad humana estaría facilitando su diseminación.

La ecóloga evolutiva de la Universidad de Pittsburgh Tia-Lynn Ashman y sus colaboradores recurrieron a la secuenciación genética para clasificar los virus presentes en el polen de flores silvestres de cuatro ambientes: praderas de California, la costa californiana, una zona agrícola de Pensilvania y la cordillera de los Apalaches. El equipo halló 22 virus, algunos causantes de graves daños en los cultivos. También descubrieron indicios de cientos de virus desconocidos. Los hallazgos coinciden con los resultados microbiológicos, asegura la viróloga vegetal de la Universidad de Florida Amit Levy, que no ha participado en el estudio: «Hemos encontrado más virus de los esperados en todos lados.»

El equipo también descubrió una correlación interesante: el polen de las flores de la zona agrícola contenía pedacitos de genoma pertenecientes a más de 100 virus, en tanto que el de las flores de las praderas californianas (donde la actividad humana es la más reducida de todas las

zonas estudiadas) solo albergaba una docena. La diversidad de virus en los demás lugares era intermedia. Los autores plantean la hipótesis de que la homogeneidad vegetal que caracteriza los campos de cultivo fomentaría la multiplicación de los virus, pues una vez que uno de ellos se adapta e infecta un cultivo encuentra muchos otros hospedadores compatibles.

Si bien este nexo es preliminar, Levy considera lógico que la agricultura industrial pueda estar reproduciendo los patógenos vegetales. «El denso crecimiento de las plantas elimina la distancia entre los cultivos.»

Ashman se pregunta si las abejas melíferas, que los agricultores crían con frecuencia, podrían estar acelerando la propagación de los virus vegetales en las regiones agrícolas. La especie es menos selectiva a la hora de escoger las plantas que la mayoría de las abejas autóctonas, por lo que podría estar acarreando virus de las flores silvestres a los cultivos y viceversa.

Hernán García-Ruiz, virólogo en la Universidad de Nebraska en Lincoln que no ha participado en el estudio, confiesa que le ha llamado la atención la cantidad de virus que ha sido descubierta incluso en plantas aparentemente sanas; tales microbios podrían no ser tan benignos si se transmitiesen de la flora silvestre a los cultivos. Cita como ejemplo el virus del mosaico de la caña azucarera, un patógeno importante de la caña y del maíz


SUMIKO SCOTT/GETTY IMAGES

Una abeja melífera posada en una amapola dorada de California (*Eschscholzia californica*).

que se oculta en las hierbas silvestres entre las temporadas de cultivo: «En cuanto el maíz crece en el campo, los insectos lo infectan con el virus», explica.

Ashman coincide en la importancia de conocer los efectos que los virus tienen sobre diversas plantas, sobre todo si se confirma que el ser humano está fomentando su propagación desde los hábitats naturales a los agrícolas y viceversa. Como hipótesis científica, encuentra esta posibilidad «tan interesante como inquietante».

Saima May Sidik

TECNOLOGÍA

RESCATE REMOTO

Los drones podrían detectar pistas forenses analizando la luz que reflejan distintas superficies

En ocasiones, los voluntarios de los equipos de rescate se pasan meses peinando parajes aislados en busca de excursionistas perdidos o víctimas de un crimen. Sin embargo, puede que pronto una nueva herramienta permita localizar pruebas forenses desde el cielo. Según los científicos, comprender cómo reflejan la luz los rastros de sangre y otras señales humanas halladas en distintas superficies naturales permitiría que las partidas de búsqueda emplearan imágenes captadas por drones para explorar con rapidez extensas áreas de terreno y hallar indicios de personas desaparecidas, vivas o muertas.

Los drones pueden ir equipados con sensores especiales, capaces de medir la intensidad de todas las longitudes de onda del espectro electromagnético (y no solo el rojo, el verde y el azul de una cámara típica) en cada píxel de una ima-


SOPHIE LINCKERSDORFF/GETTY IMAGES

Dron de rescate

gen. Los geólogos emplean con frecuencia esta técnica para localizar yacimientos minerales. Mark Krekeler, mineralogista de la Universidad Miami en Ohio y sus colaboradores se dieron cuenta de que la misma técnica, combinada con la base de datos espectrales adecuada, permitiría detectar pruebas forenses.

Para construir el dispositivo, los investigadores estudiaron la forma en que diversos elementos humanos (como la sangre, la ropa sudada o el tono de la piel) reflejaban la luz en distintas longitudes de onda. Algunos trabajos previos han examinado esas «firmas» reflectantes para identificar restos de sangre, «pero las firmas dependen de la superficie y pueden variar con el tiempo», explica Krekeler. Su equipo analizó miles de muestras, entre ellas manchas de sangre sobre diferentes tipos de roca, observando los cambios que se producían a medida que se secaba la sangre.

Los investigadores adaptaron un programa que permite combinar varias firmas conocidas para reproducir un objetivo de búsqueda específico. Por ejemplo, se pueden mezclar las firmas de las rocas y de la ropa para localizar a un excursionista perdido en las montañas; o las de la sangre, la ropa y la arena para hallar el paradero de una persona herida en un desierto.

El programa establece si el objetivo se encuentra en algún píxel de una imagen. Puede distinguir un animal de un ser humano en un bosque denso, escrutar un paisaje urbano para hallar indicios de una persona concreta vestida con una prenda azul de algodón, o determinar si el suelo está manchado de sangre o gasóleo, asegura Krekeler. El equipo presentó su trabajo en un congreso de la sección centro-norte de la Sociedad Geológica de América, celebrado el pasado mes de abril.

Wendy Calvin, planetóloga de la Universidad de Nevada en Reno que no participó en el estudio, califica de «interesante y novedoso» este uso de los datos espectrales. «La técnica parece prometedora», añade, aunque cree que utilizarla desde las alturas podría resultar complicado, dado que seguramente tendría que haber una gran cantidad de material para poder apreciarlo en un píxel.

En cuestión de meses, algunos funcionarios ya podrán descargar y probar el programa. La elaboración de protocolos de buenas prácticas para las operaciones de búsqueda favorecería el empleo rutinario de esta técnica en exploraciones y estudios forenses, opina Krekeler. Y agrega que, a medida que se vaya extendiendo el uso de drones y sensores, esos aparatos podrían transformar algunas investigaciones que hoy son costosas, arduas o incluso imposibles.

Rachel Berkowitz

MEDICINA

GOMA DE MASCAR CONTRA LA COVID-19

Un chicle que contiene una proteína producida por una lechuga genéticamente modificada es capaz de atrapar el virus SARS-CoV-2

Un tipo de chicle mezclado con una proteína que sirve como puerta de entrada del nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) a las células podría convertirse en una forma de bajo coste para ayudar a prevenir su propagación, según un estudio reciente.

La enzima convertidora de la angiotensina 2 (ACE2, por sus siglas en inglés), que está presente en la superficie de muchas células humanas, puede introducirse en la goma de mascar. Transportada a la boca con el chicle, la ACE2 intercepta el virus SARS-CoV-2 uniéndose a su proteína espícula, con lo que evita que este infecte a las células. Además, la ACE2 del chicle puede fijarse a receptores de las propias células, e inutiliza así los puntos por donde el virus suele introducirse en ellas. La combinación de ambas propiedades impide que el patógeno infecte las células de la cavidad oral, según informan los investigadores en *Molecular Therapy*.

Las células de la nariz y la garganta son las primeras del cuerpo humano que suele infectar el coronavirus. Pero la boca es también uno de los mayores reservorios de SARS-CoV-2 en una persona infectada, según señalaba un estudio en marzo de 2021. La reciente investigación sostiene ahora que la inactivación del virus en las membranas mucosas de la boca y la saliva podría también ayudar a reducir la infección en la zona nasofaríngea contigua. Si los estudios adicionales confirman los hallazgos, la goma de mascar podría sumarse a las mascarillas y al desinfectante de manos en el arsenal para detener la propagación del virus.

Para examinar esta estrategia, un equipo dirigido por el investigador farmacéutico Henry Daniell, de la Universidad de Pensilvania, modificó plantas de lechuga para hacerlas producir una forma soluble de la proteína ACE2. Luego, la lechuga pulverizada se mezcló con chicle de sabor de canela.



DELMAINE DONSON/GETTY IMAGES

Los investigadores analizaron la eficacia de la proteína en células de hámster que se habían modificado para que produjeran receptores de ACE2 humanos. Observaron que una cantidad relativamente pequeña de la proteína del chicle se asociaba a una reducción del 95 por ciento en la cantidad del virus que penetraba en las células (para el estudio, se utilizó un pseudovirus equipado con la proteína espícula del SARS-CoV-2). La cantidad del virus que entró en células de mono no modificadas también se redujo en un 85 por ciento cuando se usó el mismo pseudovirus. Y al agregar el chicle a muestras de saliva y a hisopos de fluido nasal y de garganta de tres personas infectadas con SARS-CoV-2, se observó una disminución de más del 95 por ciento en la cantidad del virus.

Daniell explica que su equipo está esperando la aprobación de la Agencia de Fármacos y Alimentos de EE.UU. para ensayar la efectividad del chicle contra el SARS-CoV-2 en las personas. La proteína se liberaría en el transcurso de unos diez minutos de masticación, descubrió Daniell al modelizar el proceso con una máquina que genera la misma fuerza que la típica masticación humana. La protección duraría cuatro ho-

ras, estima el experto. También está explorando el método del chicle contra la gripe.

Un inconveniente de esta estrategia es que el coronavirus infecte el cuerpo a través de un lugar distinto de la boca. «La principal vía de entrada del SARS-CoV-2 es la nariz», comenta el inmunólogo Danny Altmann del Colegio Imperial de Londres, ajeno al estudio. «Y el chicle puede tener escaso efecto a la hora de detener el virus en esa vía, a menos que se descubra que brinda protección en la parte posterior de la garganta.»

Pero incluso si la goma de mascar no acaba de proteger contra la infección, aún podría mitigar la propagación del virus al reducir la cantidad que una persona acumula de él en la boca, lo que disminuiría la cantidad disponible para la transmisión, según el virólogo Julian Tang, quien tampoco participó en el estudio. En el mejor de los casos, un chicle anticovídico podría estar en los estantes de las tiendas en unos seis meses, apunta Daniell. Y quizás algún día, si el nuevo coronavirus sigue siendo una amenaza, cuatro de cada cinco médicos podrían recomendar a sus pacientes la goma de mascar con ACE2.

Abdullah Iqbal

MICROBIOLOGÍA

VIDA MICROBIANA EN EL ESTROPAJO

La esponja de la cocina es un refugio ideal para multitud de bacterias

Los microorganismos pululan en la esponja de la cocina. El contacto casi permanente con los restos de alimentos no es la única razón, pues su estructura singular también tiene algo que ver. Tanto es así que, según un estudio publicado en *Nature Chemical Biology*, podría inspirar un nuevo modo de cultivar bacterias en el laboratorio.

Uno de los mayores quebraderos de cabeza para cualquier microbiólogo estriba en cultivar algunas bacterias renuentes en las condiciones de laboratorio. Algunos microbios son puntillosos en extremo, sin que podamos descubrir sus condiciones predilectas para crecer. «Es algo parecido a conseguir que los pandas críen en cautividad», compara la bacterióloga Trina McMahon de la Universidad de Wisconsin en Madison, ajena al nuevo estudio.

Las esponjas podrían tener la respuesta. Las bacterias se suelen cultivar en placas de Petri, superficies lisas y sin divisiones. Las esponjas, en cambio, están llenas de orificios y recovecos que, y ahí reside la clave, no son uniformes. «Imagine habitáculos diminutos y grandes», explica Lingchong You, microbiólogo en la Universidad Duke y coautor del estudio. La supervivencia de algunas bacterias depende de su relación con otras muchas iguales, por lo que necesitan espacio para crear comunidades grandes, pero otras precisan un aislamiento relativo para no ser eliminadas por sus vecinas. La mezcla de espacios pequeños y grandes que ofrece la esponja resulta ideal. Si bien sus posibilidades como granja de bacterias puede parecer lógica, «está demostrando ser un proceso experimental realmente difícil», aclara You. Por primera vez se han modelado entornos similares a los que ofrecen las esponjas en un ordenador y se ha comprobado que las cámaras de dimensiones variables permitirían crecer a cepas bacterianas muy distintas. Por último, los autores replicaron esos resultados en esponjas de celulosa.

«Resulta sorprendente contemplar ambos [escenarios] combinados de un modo tan elegante», opina McMahon. Pero matiza que el equipo de You trabajó con cepas de *Escherichia coli* que habían sido manipuladas en el laboratorio para que fueran dependientes de otras o bien autosuficientes, así que se pregunta si la técnica de la esponja funcionará con bacterias sensibles. Opina que «la modificación de las cepas limita lo que se puede hacer con ellas».

Futuros experimentos mostrarán si las esponjas de You son capaces de sustentar microbios silvestres. Mientras tanto, aconseja que desinfectemos la esponja de la cocina: «Seguramente no estará muy limpia».

Joanna Thompson

CAMBIO CLIMÁTICO GENERACIONAL

Los jóvenes serán quienes más sufran las consecuencias del calentamiento global

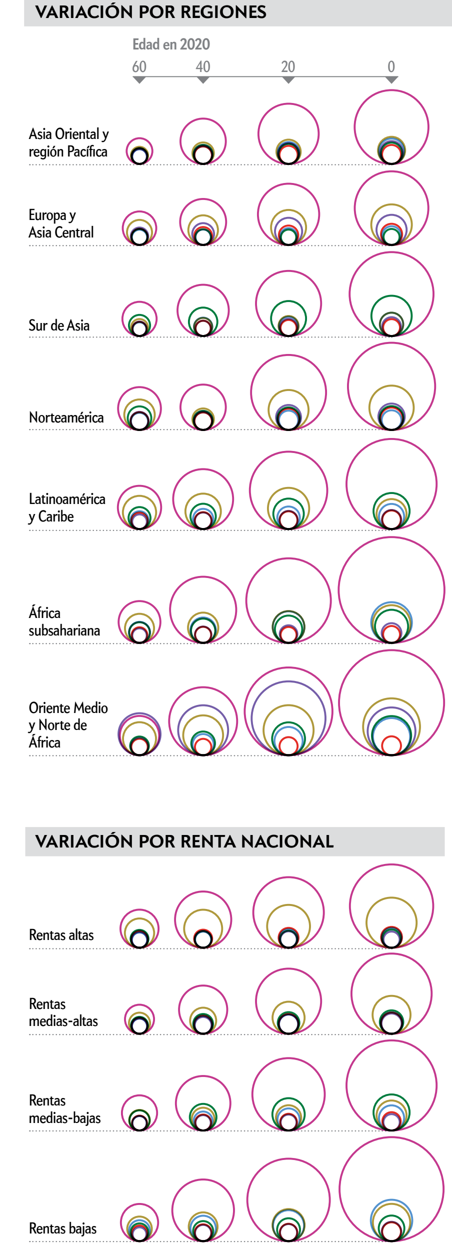
Los niños que nazcan hoy se verán mucho más afectados por los problemas derivados del cambio climático que sus padres o abuelos. En un estudio publicado hace poco en *Science*, Wim Thiery, climatólogo de la Universidad Libre de Bruselas, y sus colaboradores han combinado las predicciones de modelos climáticos en tres casos hipotéticos de calentamiento global con datos demográficos para calcular el grado en que cada generación nacida entre 1960 y 2020 se verá expuesta a seis tipos de fenómenos meteorológicos extremos. Thiery afirma que, a pesar de ser plenamente consciente de los peligros que entraña el aumento de las temperaturas, «ver las cifras desde la perspectiva de una persona, de un padre, es como recibir un puñetazo en el estómago». Los jóvenes de Oriente Medio y del África subsahariana, así como los de países de rentas bajas, son los que verán aumentar más su exposición. Tales estimaciones solo consideran los cambios en la frecuencia de los fenómenos extremos, pero no en su intensidad o duración. Thiery señala que, si bien «las generaciones jóvenes son las que se verán más perjudicadas si el calentamiento se acentúa», también son las que más podrían salir ganando si se logra poner freno a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Andreas Thompson

El tamaño de los círculos indica en qué factor aumentará cada fenómeno para cada intervalo de edad en el caso de un calentamiento de 2,4 °C

50×
25×
2×

— Olas de calor
— Sequías
— Pérdida de cosechas
— Crecidas
— Incendios forestales
— Ciclones tropicales



EXPOSICIÓN A FENÓMENOS EXTREMOS POR EDAD

Intuitivamente, las generaciones más jóvenes sufrirán más las consecuencias del cambio climático que sus predecesoras. Pero los análisis cuantitativos solo se limitan a poner de manifiesto las diferencias, sobre todo en lo relativo a la exposición a las olas de calor.

La saturación del color refleja los incrementos asociados a tres casos hipotéticos de calentamiento

1,5°C más cálido hacia 2100 (*más claro*)

2,0°C más cálido hacia 2100 (*intermedio*)

2,4°C más cálido, en consonancia con los compromisos actuales (*más intenso*)

Los cuadrados muestran en qué factor aumentará cada fenómeno para cada rango de edad en comparación con la época preindustrial

Ciclones tropicales
Incendios forestales
Crecidas
Pérdida de cosechas
Sequías
3×
60 40 20 0
Edad en 2020

Olas de calor
35
30
25
20
10
15
5
0
60 40 20 0
Edad en 2020

FUENTE: «INTERGENERATIONAL INEQUITIES IN EXPOSURE TO CLIMATE EXTREMES», WIM THIERY ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 374, 26 DE SEPTIEMBRE DE 2021 (*datos*). AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

LA IMAGEN DEL MES

VEGETACIÓN ADAPTADA AL **DESIERTO**

Ciertos genes ayudan a las plantas del Atacama a soportar las duras condiciones ambientales

Cada abril de la década pasada, el biólogo Rodrigo Gutiérrez visitó uno de los lugares más áridos de la Tierra: el desierto de Atacama. Allí recolectaba plantas y muestras de suelo que congelaba en nitrógeno líquido antes de regresar al laboratorio, en la Pontificia Universidad Católica de Chile. En un nuevo estudio publicado en *PNAS*, él y sus colaboradores describen los genes de las plantas y de los microorganismos que las ayudan a medrar en esas condiciones tan hostiles. Los investigadores rastrearon los cambios evolutivos en su genoma y descubrieron mutaciones adaptativas relacionadas con la respuesta al estrés, el metabolismo y la producción de energía. Esas mutaciones ayudarían a las plantas a soportar la intensa radiación solar, optimizar la captación de agua y ajustar la época de floración. También descubrieron gran abundancia de bacterias en las raíces, que transforman el nitrógeno atmosférico en una forma que facilita el crecimiento vegetal en los suelos privados de ese elemento. Gutiérrez explica que tal vez sea posible insertar los genes recién descubiertos en cultivos alimentarios y en herbáceas usadas para fabricar biocombustibles, lo que daría a esas especies mayores posibilidades de supervivencia en terrenos salinos y sometidos a períodos de sequía, que se prevé serán más severos con el cambio climático.

Susan Cosier



MAURITIUS IMAGES GMBH/ALAMY STOCK PHOTO

FÍSICA TEÓRICA

EL ORIGEN DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO

Adam Becker | El espaciotiempo podría emerger a partir de una realidad más fundamental. Descubrirla quizá nos acerque a uno de los retos más apremiantes de la física: una teoría cuántica de la gravedad



STEFANIA INFANTE

Natalie Paquette se pasa el tiempo pensando en cómo generar una dimensión adicional. Empieza con pequeños círculos distribuidos por todos los puntos del espacio y del tiempo, que representan una dimensión plegada sobre sí misma. Luego reduce más y más el tamaño de esos círculos, hasta que sucede algo sorprendente: la dimensión deja de contraerse y se torna enorme. Es como cuando nos damos cuenta de que algo que parecía pequeño y cercano, en realidad, es inmenso y distante. «Encogemos una dirección espacial», explica Paquette, «pero, pasado cierto punto, lo que emerge es una nueva dirección espacial grande».

Paquette, física teórica de la Universidad de Washington, no es la única que cavila sobre ese extraño tipo de transmutaciones dimensionales. Cada vez más físicos, expertos en distintas áreas y con diferentes estrategias, van convergiendo a una idea profunda: el espacio (y quizás incluso el tiempo) no es un elemento fundamental. En cambio, tanto el espacio como el tiempo podrían ser «emergentes»: surgirían a partir de la estructura y el comportamiento de otros componentes más básicos de la naturaleza. Al nivel más profundo de la realidad, puede que preguntas como «¿dónde?» o «¿cuándo?» no tengan respuesta. «La física nos da muchas pistas de que el espaciotiempo, tal y como lo entendemos, no es fundamental», corrobora Paquette.

Estas ideas radicales son el resultado de recientes desarrollos en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad, una empresa que dura ya cien años. La mejor descripción de la gravedad que poseen los físicos es la que proporciona la relatividad general, la famosa teoría de Albert Einstein sobre cómo la materia curva el espacio y el tiempo. Y la mejor teoría para todo lo demás es la mecánica cuántica, que detalla de manera excepcionalmente precisa las propiedades de la materia, la energía y las partículas subatómicas. Ambas teorías han salido airosas de todas las pruebas que los físicos han diseñado en el último siglo, y podríamos pensar que, si las juntásemos, tendríamos una «teoría del todo».

Pero esas dos teorías no casan bien. Si le preguntamos a la relatividad general por lo que sucede en el dominio cuántico, obtenemos repuestas contradictorias, plagadas de infinitos que infestan todos los cálculos. La naturaleza sabe aplicar la gravedad en contextos cuánticos —ocurrió en los primeros momentos tras la gran explosión, y continúa pasando en el interior de los agujeros negros—, pero nosotros seguimos intentando entender cómo lo hace. Parte del problema radica en la manera en la que ambas teorías lidian con el espaciotiempo: mientras que la física cuántica trata el espacio y el tiempo como inmutables, la relatividad general los deforma desde el principio.

En síntesis

Las dos principales teorías que buscan unificar la mecánica cuántica y la gravedad sugieren que el espacio y el tiempo podrían no ser fundamentales, sino surgir a partir de otros componentes más básicos de la naturaleza.

En la teoría de cuerdas, ese proceso estaría vinculado al entrelazamiento, un fenómeno que conecta las propiedades de los sistemas cuánticos. Mientras, la teoría cuántica de bucles postula un espaciotiempo formado por trozos discretos que se combinan entre sí.

Aunque hay esperanzas de que los experimentos de laboratorio y las observaciones cosmológicas sirvan para poner a prueba estas ideas, aún no está claro si llegaremos a descubrir la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo.

Una teoría cuántica de la gravedad debereconciliar de algún modo esas ideas acerca del espaciotiempo. Una posibilidad es eliminar el problema de raíz, haciendo que tanto el espacio como el tiempo emerjan a partir de algo más fundamental. En los últimos años, diversas líneas de investigación han propuesto que, en los estratos más profundos de la realidad, el espacio y el tiempo no existen en el mismo sentido en que los percibimos a nuestro alrededor. A lo largo del último decenio, tales ideas han transformado drásticamente la forma en que los físicos piensan sobre los agujeros negros. Ahora, los investigadores las usan para dilucidar las propiedades de objetos aún más exóticos: los agujeros de gusano, hipotéticos «túneles» que conectarían puntos lejanos del espaciotiempo. Estos éxitos han mantenido viva la esperanza de que se produzca un descubrimiento aún más relevante. Si el espaciotiempo es emergente, averiguar de dónde proviene y cómo puede surgir a partir de otra cosa podría abrir la puerta, por fin, a una teoría del todo.

Dueto de cuerda

Hoy por hoy, la teoría de cuerdas es la candidata más popular entre los físicos para una teoría

cuántica de la gravedad. Las cuerdas que dan nombre a la teoría serían los constituyentes básicos de la materia y la energía, y darían lugar a la miríada de partículas subatómicas que vemos en los aceleradores de todo el mundo. Las cuerdas explicarían incluso la gravedad, ya que una de las consecuencias inevitables de la teoría es la existencia de la partícula que supuestamente transmite la fuerza gravitatoria: el gravitón.

Pero la teoría de cuerdas es difícil de entender, ya que reside en un territorio formal que físicos y matemáticos han tardado décadas en inspeccionar. Gran parte de la estructura de la teoría permanece inexplorada, con expediciones tan solo en proyecto y mapas por trazar. En este ámbito, la principal técnica de navegación son las dualidades matemáticas, correspondencias entre dos sistemas distintos.

Tanto la gravedad cuántica de bucles como la teoría de cuerdas afirman que el espaciotiempo emerge de una realidad subyacente

Un ejemplo sería la dualidad entre dimensiones grandes y pequeñas con la que abríamos el artículo. Si intentamos embutir una dimensión en un espacio muy reducido, la teoría de cuerdas nos dice que acabaremos con algo matemáticamente idéntico a un espacio donde esa dimensión es enorme. Las dos situaciones son equivalentes, según la teoría: podemos pasar libremente de una a otra y usar una de ellas para entender cómo funciona la otra. «Si seguimos el rastro de los componentes fundamentales de la teoría», afirma Paquette, «encontramos de forma natural que [...] a veces es posible generar una nueva dimensión espacial».

Una dualidad similar sugiere a muchos expertos en teoría de cuerdas que el propio espacio es emergente. La idea surgió en 1997, cuando Juan Maldacena, físico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton que por entonces trabajaba en la Universidad Harvard, descubrió una dualidad entre una clase bien conocida de teorías cuánticas, las teorías de campos conformes (CFT, por sus siglas en inglés), y un tipo particular de espaciotiempos de la relatividad general, llamados de anti-De Sitter (AdS). Aunque parecen dos sistemas radicalmente distintos —las CFT carecen por completo de gravedad, mientras que el espaciotiempo de AdS contiene toda la gravedad de Einstein—, ambos están descritos por las mismas matemáticas. El hallazgo de la correspondencia AdS/CFT estableció una conexión matemática tangible entre la teoría cuántica y todo un universo provisto de gravedad.

Curiosamente, el espaciotiempo de AdS de la correspondencia AdS/CFT tiene una dimensión más que aquel donde «vive» la CFT cuántica. A los físicos esta diferencia les resulta muy interesante, ya que proporciona un claro ejemplo del principio holográfico, otro tipo de correspondencia concebida años antes por los físicos Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y Leonard Susskind, de la Universidad Stanford. Basándose en algunas características peculiares de los agujeros negros, 't Hooft y Susskind sospecharon que las propiedades de una región del espacio podían estar «codificadas» en su frontera. En otras palabras, la superficie bidimensional de un agujero negro contendría toda la información necesaria para saber qué ocurre en su interior tridimensional, como en un holograma. «Creo que mucha gente pensó que nos habíamos vuelto locos», bromea Susskind. «Dos buenos físicos echados a perder.»

De forma similar, en la correspondencia AdS/CFT, la teoría cuántica tetradimensional codifica todo el espaciotiempo de AdS de cinco dimensiones asociado a ella. En este escenario, el espaciotiempo surge a partir de las interacciones entre los componentes del sistema cuántico de la teoría de campos conforme. Maldacena lo compara con la lectura de una novela: «los personajes de un libro hacen cosas», explica, «pero todo lo que tenemos nosotros es una línea de texto, y a partir de ella inferimos lo que hacen los personajes. Estos serían como el espaciotiempo de AdS de la teoría, y la línea de texto sería la CFT.»

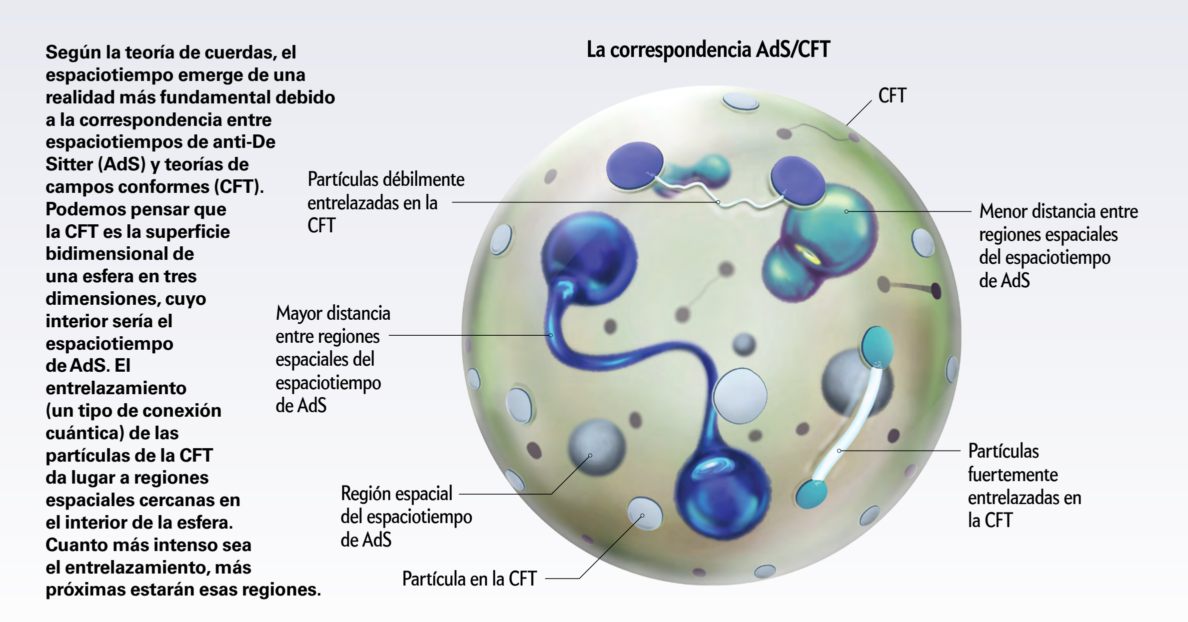
Pero ¿de dónde proviene el espacio del espaciotiempo de AdS? Si es emergente, ¿de dónde emerge? La respuesta es un tipo extraño y espe-

Cómo podrían emerger el espacio y el tiempo

Tradicionalmente, el espaciotiempo se ha considerado el telón de fondo del universo. Pero nuevas investigaciones indican que podría no ser un elemento fundamental, sino una propiedad emergente asociada a una realidad más básica, que constituiría el verdadero sustrato del cosmos. Esta idea proviene de dos teorías que intentan conectar la relatividad general y la mecánica cuántica: la teoría de cuerdas, que sustituye las partículas subatómicas por diminutas cuerdas cerradas vibrantes, y la gravedad cuántica de bucles, que contempla un espaciotiempo dividido en pequeños trozos discretos que se combinan para formar un continuo con apariencia suave.

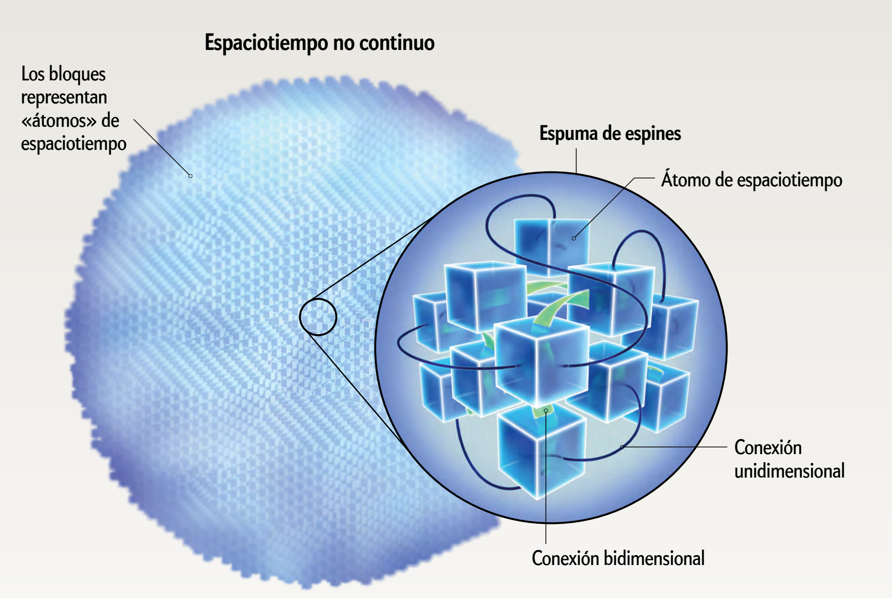
TEORÍA DE CUERDAS

Según la teoría de cuerdas, el espaciotiempo emerge de una realidad más fundamental debido a la correspondencia entre espaciotiempos de anti-De Sitter (AdS) y teorías de campos conformes (CFT). Podemos pensar que la CFT es la superficie bidimensional de una esfera en tres dimensiones, cuyo interior sería el espaciotiempo de AdS. El entrelazamiento (un tipo de conexión cuántica) de las partículas de la CFT da lugar a regiones espaciales cercanas en el interior de la esfera. Cuanto más intenso sea el entrelazamiento, más próximas estarán esas regiones.



GRAVEDAD CUÁNTICA DE BUCLES

Según esta teoría, el espaciotiempo no es continuo: si lo observáramos con suficiente resolución, veríamos que en realidad está formado por trozos o «átomos». Si experimentamos un espaciotiempo continuo es gracias a que esos elementos están conectados por líneas unidimensionales o superficies bidimensionales, conexiones que forman una «espuma de espines».



ELENA HARTLEY

cial de interacción cuántica en la CFT: el entrelazamiento, una conexión a distancia entre los objetos que correlaciona sus comportamientos al instante y de maneras estadísticamente improbables. Es bien sabido que la existencia del entrelazamiento irritaba a Einstein, que lo tildó de «acción fantasmal a distancia» [*véase* «Acción fantasmal», por Ronald Hanson y Krister Shalm; Investigación y Ciencia, febrero de 2019].

Pese a su carácter fantasmal, el entrelazamiento es una propiedad central de la mecánica cuántica. Cuando dos objetos cuánticos interaccionan, en general se entrelazan y se mantienen así mientras permanezcan aislados del resto del mundo, sin importar cuánto se separen. Los físicos han demostrado mediante experimentos que el entrelazamiento entre partículas persiste aunque estas se alejen a más de 1000 kilómetros, incluso si una está sobre la Tierra y la otra en órbita. En principio, las partículas entrelazadas podrían conservar su conexión aunque se hallaran en extremos opuestos de la galaxia o del universo. La distancia simplemente no parece jugar ningún papel en el entrelazamiento, un enigma que ha traído de cabeza a muchos físicos durante décadas.

Pero si el espacio fuera emergente, la capacidad del entrelazamiento para persistir a grandes distancias no sería tan misteriosa: después de todo, la distancia no sería más que un constructo. Según los estudios de la correspondencia AdS/CFT realizados por los físicos Shinsei Ryu, de la Universidad de Princeton, y Tadashi Takayanagi, de la Universidad de Kioto, el entrelazamiento es lo que da lugar a la distancia en el espaciotiempo de AdS. Así, dos regiones espaciales cercanas cualesquiera se corresponden con dos componentes cuánticos muy entrelazados en la teoría de campos conforme. Y cuanto más entrelazados estén, más proximas se encontrarán las regiones.

En los últimos años, los físicos han llegado a sospechar que esa relación podría ser aplicable al propio universo. «¿Qué es lo que mantiene al espacio unido y evita que se fragmente en subregiones separadas? La respuesta es el entrelazamiento entre sus partes», afirma Susskind. «La continuidad y conectividad del espacio debe su existencia al entrelazamiento cuántico.» Por lo tanto, el entrelazamiento podría fortalecer la estructura del espaciotiempo, dando lugar al tejido que produce la geometría del universo. «Si pudiéramos eliminar de alguna forma el entrelazamiento entre dos partes del espacio, este se vendría abajo», asegura Susskind. «Haría lo contrario de emerger. “Desemergería.”»

Para explorar los efectos cuánticos de la gravedad, haría falta un acelerador de partículas del tamaño de una galaxia

Si el espacio está hecho de entrelazamiento, el rompecabezas de la gravedad cuántica parece mucho más fácil de resolver: en lugar de intentar explicar la curvatura del espacio de manera cuántica, el mismo espacio aparecería como resultado de un fenómeno esencialmente cuántico. Susskind sospecha que esa es la razón por la que está siendo tan difícil encontrar una teoría cuántica de la gravedad. «Creo que esos intentos nunca han funcionado demasiado bien porque partían de dos cosas diferentes, la relatividad general y la mecánica cuántica, e intentaban combinarlas», argumenta. «Para mí, la clave es que esas dos teorías poseen una conexión demasiado íntima como para poder separarlas y juntarlas de nuevo. No hay gravedad sin mecánica cuántica.»

Sin embargo, dar cuenta del espacio emergente representa solo la mitad del trabajo. Con el espacio y el tiempo ligados de forma tan estrecha en la relatividad general, cualquier descripción del modo en que emerge el espacio debería explicar el origen del tiempo. «El tiempo también tiene que surgir de alguna manera», incide Mark van Raamsdonk, físico de la Universidad de la Columbia Británica y pionero en la conexión entre el entrelazamiento y el espaciotiempo. «Pero eso es algo que no entendemos bien y que constituye un campo de investigación muy activo», señala.

Otra área activa, prosigue, consiste en usar modelos de espaciotiempo emergente para entender los agujeros de gusano. Hasta ahora, muchos físicos creían que enviar objetos a través de agujeros de gusano era imposible, incluso en

teoría. Pero, en los últimos años, algunos físicos que trabajan en la correspondencia AdS/CFT y otros modelos similares han hallado una nueva forma de construir esos agujeros. «No está claro si es aplicable a nuestro universo», puntualiza Van Raamsdonk. «Pero ahora sabemos que ciertos tipos de agujeros de gusano transitables son viables desde el punto de vista teórico.» Dos artículos de 2016 y de 2018 condujeron a la febril actividad que se vive en este campo. No obstante, incluso si fuera posible construir agujeros de gusano transitables, seguramente no serían muy útiles de cara a los viajes espaciales. Y es que Susskind apunta que «no es posible atravesar un agujero de gusano más rápido de lo que tardaría la luz en recorrer el camino más largo».

Espacio para pensar

Si los expertos en teoría de cuerdas están en lo cierto, el espacio se construye a partir del entrelazamiento cuántico, y lo mismo podría ocurrir con el tiempo. Pero ¿qué significa eso en realidad? ¿Cómo puede el espacio «estar hecho» del entrelazamiento entre objetos, a menos que estos se hallen en algún sitio? ¿Cómo pueden tales objetos entrelazarse, a no ser que experimenten el tiempo y el cambio? ¿Y qué tipo de existencia podrían tener las cosas, sin habitar en un espacio y un tiempo auténticos?

Esas cuestiones están en la frontera de la filosofía, y los filósofos de la física se las toman muy en serio. «¿Cómo diantres podría el espaciotiempo ser algo emergente?», se pregunta Eleanor Knox, filósofa de la física del King's College de Londres. Intuitivamente parece imposible, afirma. Pero Knox no cree que eso sea un problema. «Nuestra intuición a veces funciona muy mal», aduce. «Evolucionó en la sabana africana, a partir de las interacciones con macroobjetos, macrofluidos y animales biológicos», y no suele ser transferible al mundo de la mecánica cuántica. Cuando hablamos de la gravedad cuántica, «"¿dónde están las cosas?" o "¿dónde residen?" no son las preguntas correctas», concluye Knox.

Sin duda, es cierto que los objetos que encontramos en nuestra vida cotidiana están situados en lugares. Pero, como señalan Knox y muchos otros, eso no implica que el espacio y el tiempo tengan que ser fundamentales: tan solo deben emerger de forma eficaz de algún elemento que sí lo sea. El filósofo de la física Christian Wüthrich, de la Universidad de Ginebra, pone el ejemplo de un líquido: «En última instancia, está compuesto por partículas elementales, como electrones, protones y neutrones, o incluso —a un nivel más básico— quarks y leptones. Pero ¿acaso tienen los quarks y los leptones las propiedades de un fluido? Eso no tiene sentido. Sin embargo, cuando esas partículas fundamentales se agrupan en número suficiente, muestran cierto comportamiento colectivo y actúan de la manera en la que lo hace un líquido».

El espacio y el tiempo, afirma Wüthrich, podrían funcionar del mismo modo en la teoría de cuerdas y otras teorías cuánticas de la gravedad. En concreto, el espaciotiempo podría emerger a partir de aquello que normalmente pensamos que «habita» en el universo: la propia materia y energía. «No es que primero haya espacio y tiempo, y entonces añadamos la materia», explica Wüthrich. «Puede que la existencia de algo material sea una condición necesaria para que haya espacio y tiempo. Esa sigue siendo una conexión muy íntima, pero que va en un sentido opuesto al que podríamos haber supuesto en un principio.»

No obstante, también hay otras formas de interpretar los resultados recientes. La correspondencia AdS/CFT suele considerarse un ejemplo de cómo el espaciotiempo puede emerger de un sistema cuántico. Pero según Alyssa Ney, filósofa de la física en la Universidad de California en Davis, quizás no sea eso lo que muestra. «La correspondencia AdS/CFT nos proporciona un manual de traducción que relaciona hechos acerca del espaciotiempo con otros acerca de la teoría cuántica», indica Ney. «Eso es compatible con pensar que el espaciotiempo es emergente y cierta teoría cuántica es fundamental.» Pero también con lo contrario, añade. La correspondencia podría significar que la teoría cuántica es emergente y el espaciotiempo fundamental, o que ninguno de ellos es fundamental y existe una teoría más básica aún por descubrir. Decir que el espaciotiempo es emergente constituye una afirmación muy fuerte, valora Ney, quien asegura estar abierta a la posibilidad de que sea cierta. «Pero, fijándonos exclusivamente en la correspondencia AdS/CFT, todavía no veo argumentos claros que la apoyen.»

La imagen de un espaciotiempo emergente que ofrece la teoría de cuerdas podría encerrar un reto aún mayor, oculto en el mismo nombre de la correspondencia AdS/CFT. «No vivimos en un espaciotiempo de anti-De Sitter», subra-



STEFANIA INFANTE

ya Susskind, «sino en algo mucho más parecido a un espaciotiempo de De Sitter». Este último describe un universo en expansión acelerada muy similar al nuestro. «Y aún no tenemos la menor idea de cómo funciona [la holografía] en ese caso», admite Susskind. Formular una correspondencia de este tipo en un espacio que se asemeje más a nuestro universo real es una de las cuestiones más apremiantes para los expertos en teoría de cuerdas. «Creo que vamos a lograr comprender mejor cómo obtener una versión cosmológica de todo esto», opina Van Raamsdonk.

Por último, también están las noticias (o, más bien, la ausencia de ellas) procedentes de los aceleradores de partículas más modernos. Estos no han hallado ninguna prueba de las nuevas partículas predichas por la supersimetría, una idea en la que se basa la teoría de cuerdas [*véase* «La supersimetría y la crisis de la física», por Joseph Lykken y Maria Spiropulu; Investigación y Ciencia, junio de 2014]. La supersimetría exige que todas las partículas conocidas tengan sus propias «supercompañeras», lo que multiplica por dos el número de partículas fundamentales. Pero el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, diseñado en parte para buscar estas supercompañeras, no ha detectado ninguna señal de ellas. Según Susskind, «todas las versiones precisas [del espaciotiempo emergente] de las que disponemos implican una teoría supersimétrica. Sin supersimetría, se desvanece nuestra capacidad de seguir matemáticamente las ecuaciones».

Átomos de espaciotiempo

La teoría de cuerdas no es la única propuesta que sugiere que el espaciotiempo es emergente. Esta teoría «no ha estado a la altura en cuanto a su promesa de unificar la gravedad y la mecánica cuántica», según Abhay Ashtekar, físico de la Universidad Estatal de Pensilvania. «La pujanza actual de la teoría de cuerdas consiste en proporcionar una rica panoplia de herramientas que se han usado con profusión en todo el espectro de la física.» Ashtekar es uno de los pioneros de la alternativa más popular a la teoría de cuerdas, la denominada gravedad cuántica de bucles. En esta teoría, el espacio y el tiempo no son suaves y continuos como en la relatividad general, sino que están hechos de componentes discretos a los que Ashtekar se refiere como «trozos o átomos de espaciotiempo».

¿Llegaremos a conocer alguna vez la naturaleza real del espacio y el tiempo?

Esos átomos de espaciotiempo están conectados en una red, unidos por superficies de una o dos dimensiones para formar lo que quienes trabajan en gravedad cuántica de bucles llaman una «espuma de espines». Y aunque solo pueda tener dos dimensiones, esa espuma da lugar a nuestro espaciotiempo con tres dimensiones espaciales y una temporal. Para ilustrar el proceso, Ashtekar lo compara con una prenda de vestir: «si cogiésemos una lupa, veríamos inmediatamente que la tela está hecha de fibras unidimensionales. Lo que ocurre es que esas fibras están tan entretejidas que, a efectos prácticos, podemos pensar que una camisa es una superficie bidimensional. De forma similar, el espacio a nuestro alrededor parece un continuo tridimensional, pero en realidad es un entramado de estos [átomos de espaciotiempo]».

Aunque tanto la teoría de cuerdas como la gravedad cuántica de bucles sugieren que el espaciotiempo es emergente, los detalles difieren en ambas teorías. Según la teoría de cuerdas, el espaciotiempo (o al menos el espacio) surge a partir del comportamiento de un sistema aparentemente no relacionado, gracias al entrelazamiento cuántico. Pensemos en cómo se forman los atascos debido a las decisiones colectivas de los conductores: los coches no están hechos de tráfico, sino que hacen el tráfico. En la gravedad cuántica de bucles, por su parte, la manera en la que emerge el espaciotiempo se parece más a la aparición de las dunas a partir del movimiento de los granos de arena cuando sopla el viento. El espaciotiempo suave con el que estamos familiarizados proviene del comportamiento colectivo de diminutos «granos» de espaciotiempo, igual que en nuestro ejemplo, donde los granos cristalinos siguen siendo arena aunque no se parezcan en nada a una ondulante duna.

Más allá de esas diferencias, tanto la gravedad cuántica de bucles como la teoría de cuerdas

afirman que el espaciotiempo emerge de una realidad subyacente. Y tampoco son las únicas propuestas que van en esa dirección. La teoría de conjuntos causales, otra posible candidata a teoría cuántica de la gravedad, también postula que el espacio y el tiempo constan de componentes más básicos. «Lo realmente llamativo es que el mensaje de la mayoría de teorías de gravedad cuántica verosímiles es que, de alguna manera, el espaciotiempo de la relatividad general no está presente a nivel fundamental», destaca Knox. «La gente se entusiasma cuando varias de estas teorías coinciden al menos en algún aspecto.»

Las preguntas correctas

La física moderna es víctima de su propio éxito. Dada la fenomenal precisión de la física cuántica y la relatividad general, la gravedad cuántica solo es necesaria para describir situaciones extremas, cuando hay masas gigantescas en espacios diminutos. Esas condiciones solo se dan en ciertos lugares de la naturaleza, tales como el centro de un agujero negro, y no es posible reproducirlas en un laboratorio, por muy grande y potente que sea. Para explorar las condiciones en las que dominan los efectos cuánticos de la gravedad, haría falta un acelerador de partículas del tamaño de una galaxia. Esta falta de datos experimentales directos es, en gran medida, la razón por la que la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad se está alargando tanto.

Eso ha hecho que la mayoría de los físicos pongan sus esperanzas en el firmamento. En los primeros momentos tras la gran explosión, el universo entero era increíblemente pequeño y denso. Así pues, se hallaba en un estado cuya descripción requiere una teoría cuántica de la gravedad. Y los ecos de esa época tan temprana aún podrían estar presentes en el cielo. «Creo que nuestra mejor apuesta [para poner a prueba la gravedad cuántica] es la cosmología», afirma Maldacena. «Quizás haya algún aspecto cosmológico que hoy creemos impredecible, pero que puede ser predicho una vez que entendamos la teoría completa, o algún nuevo elemento en el que aún ni siquiera hemos pensado.»

Sin embargo, los experimentos de laboratorio pueden resultar útiles para comprobar la teoría de cuerdas, al menos de manera indirecta. Los científicos esperan estudiar la correspondencia AdS/CFT construyendo sistemas de átomos muy entrelazados y analizando si en su comportamiento aparece algo análogo al espaciotiempo y la gravedad. Según Maldacena, estos experimentos podrían «mostrar algunas características de la gravedad, aunque quizás no todas. También depende de a qué nos refiramos exactamente con "gravedad"».

¿Llegaremos a conocer alguna vez la naturaleza real del espaciotiempo? Los datos observacionales del cielo tal vez tarden en llegar, y los experimentos de laboratorio podrían ser un fracaso. Y los filósofos saben bien que las preguntas sobre la verdadera naturaleza del espacio y del tiempo son muy antiguas. Lo que existe «es ahora, todo a la vez, uno y continuo», dijo el filósofo griego Parménides hace 2500 años. «Todo está lleno de lo que es.» Parménides insistió en que el tiempo y el cambio eran ilusiones, en que todo a nuestro alrededor era uno y lo mismo. Su discípulo Zenón de Elea ideó sus famosas paradojas para demostrar las afirmaciones de su maestro, en un intento de probar que el movimiento a lo largo de cualquier distancia era imposible. El trabajo de ambos suscitó la pregunta de si el tiempo y el espacio son de alguna manera ilusorios, una inquietante posibilidad que ha perseguido a la filosofía occidental durante más de dos milenios.

«El hecho de que los antiguos griegos se preguntaran cosas como "¿qué es el espacio?", "¿qué es el cambio?" y que nosotros nos sigamos haciendo las mismas preguntas indica que son las cuestiones correctas», opina Wüthrich. «Pensando sobre este tipo de problemas hemos aprendido mucho sobre la física.»

Adam Becker es escritor científico en el Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley y autor de *What is real?* (Basic Books, 2018), un libro sobre el desarrollo y las interpretaciones de la mecánica cuántica. Sus trabajos han aparecido en medios como *The New York Times* y la BBC. Además, es doctor en cosmología por la Universidad de Míchigan.



EN NUESTRO ARCHIVO

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.
Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015.
La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia. Sabine Hossenfelder en *IyC*, enero de 2017.
Enredados en el espaciotiempo. Clara Moskowitz en *IyC*, marzo de 2017.
Una dualidad maravillosa. Miguel Ángel Vázquez-Mozo en *IyC*, noviembre de 2017.
¿Qué es el espaciotiempo? George Musser en *IyC*, agosto de 2018.



EVOLUCIÓN

EL GENOMA GIGANTE DE LAS SALAMANDRAS

Douglas Fox | La gran cantidad de ADN basura deforma el cuerpo de estos anfibios. Sin embargo, su sorprendente pervivencia obliga a repensar la evolución

ANDREW HETHERINGTON

Uno diría que el necturo del río Neuse vive una existencia cansina, como si soportase un lastre invisible. Esta salamandra parda y moteada, larga como una mano, se aleja raras veces de su escondrijo bajo las piedras o los troncos caídos en los ríos de Carolina del Norte. «Caza» inmóvil, posada en el fondo, a la espera de que un insecto nade a su alcance, momento en el que se abalanza sobre él para engullirlo en un acto reflejo. Toda su vida transcurre en el agua, en forma de larva agrandada que deja inconclusa la metamorfosis, sostenida por unas patas enclenques, con dedos a medio brotar, el maxilar superior atrofiado y branquias plumosas que no pierde en la madurez.

Si se la observa más de cerca, sale a relucir otra rareza: las células del cuerpo son hasta 300 veces mayores que las de un lagarto, un ave o un mamífero. Con un microscopio simple es posible ver los glóbulos rojos en circulación por los capilares de las branquias transparentadas.

Con otras salamandras, este necturo (*Necturus lewisi*) forma parte de un enigma que hemos comenzado a desentrañar no hace mucho. La causa de tan peculiares rasgos es una carga oculta: cada célula está henchida de ADN, pues alberga 38 veces más que una célula humana. Posee el mayor genoma entre los tetrápodos terrestres. Los únicos animales equiparables son los peces pulmonados, de similares hábitos pausados.

El genoma de gran parte de los mamíferos, aves, reptiles y peces está compuesto por entre 500 y 6000 millones de pares de base de ADN: un margen estrecho. Los pares de bases forman los genes, enlazados en una larga cadena que conforma el genoma del animal. En cambio, el de las salamandras muestra una gama de tamaños inaudita, entre 10.000 y 120.000 millones de pares de bases (entre 10 y 120 gigabases). Y no es que posean más genes que los demás, es que el genoma rebosa de segmentos de ADN «basura», que se han multiplicado sin freno. Todos los aspectos de su día a día están dominados por esa desmesura, que ha empujado a las salamandras a la senda lenta de la existencia. Se abren paso por la vida, que puede prolongarse 100 años, con un cuerpo a medio hacer, un cerebro reducido y un corazón tan delgado como el papel de liar.

Como contrapartida de semejante carga, por los menos estos anfibios urodelos han adquirido presumiblemente un don maravilloso: el de la regeneración. No solo les rebrotan las extremidades amputadas, sino también una cuarta parte del cerebro si se les extirpa, sin duda algo práctico cuando hablamos de supervivencia.

Las salamandras deben esos extraños rasgos al ADN, pero no del modo que pudiéramos pensar. El ADN suele describirse como el programa de la vida, pues contiene la información precisa para definir la estructura y la función de cada célula en todas las especies vivientes. Pero los últimos descubrimientos sobre estos urodelos parecen echar por tierra esa idea arraigada del genoma engranado con precisión. Estos revelan que el ADN también modela a su poseedor de formas que nada tienen que ver con el contenido de información, hasta el extremo de deformar el cuerpo y los órganos como un espejo de feria; ninguna especie es capaz de tolerarlo en tan vasta cantidad sin sufrir esos efectos secundarios. De hecho, nuestra propia especie pudiera estar rozando el límite. Si el genoma humano creciese más, pondría en riesgo nuestra principal baza: la inteligencia.

En el caso de las salamandras, uno se pregunta por qué tamaña carga no las ha condenado a la extinción. Su excepcional pervivencia deja entrever que nuestra idea de la evolución tiene un grave sesgo moralista, sobre todo en lo tocante a «la supervivencia de los más aptos»: *trabaja duro, especie joven, pon a punto tu cuerpo y tu cerebro, y algún día triunfarás*. En cambio, ellas han descubierto el modo de engañar al sistema; el secreto de su éxito ha consistido en apostar por la ley del mínimo esfuerzo.

En síntesis

Cuando se descubrió el ADN se supuso que las especies más desarrolladas y complejas tendrían más genes y, por tanto, genomas más voluminosos. Pero pronto se observó que ciertos animales simples, como las salamandras, albergaban docenas de veces más ADN que las de los humanos.

Su genoma contiene muchos más transposones, elementos no codificantes que se insieren a lo largo de él de forma repetitiva. Estos influyen en las deformaciones anatómicas y el lento desarrollo de estos anfibios, aunque también los dota de la capacidad de regeneración.

Se postula que este ADN repetitivo es un material útil para la evolución. La cantidad que una especie es capaz de acumular guarda relación con su velocidad de desarrollo, ritmo metabólico y modo de vida.



ANDREW HETHERINGTON

LAS SALAMANDRAS poseen un genoma gigantesco que las condena a vivir con un cuerpo infantil. Como contrapartida, podría concederles la facultad de regenerar las extremidades y hasta algunas partes del cerebro.

Un genoma desmesurado

El misterio de los genomas gigantes surgió hace décadas, durante un momento decisivo en que los biólogos acababan de descubrir la molécula de la herencia en el ADN. Único de cada especie, el genoma contiene miles de genes que indican a las células cómo sintetizar proteínas y otras moléculas que hacen de cada ser vivo lo que es. En un principio, los estudiosos supusieron que las especies avanzadas y dotadas de cuerpos complejos, como los primates y el ser humano, tendrían más genes y, por lo tanto, genomas más voluminosos.

Pero Alfred Mirsky y Hans Ris, del Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, ya refutaron esa creencia en 1951 tras medir la cantidad de ADN que contenían las células de docenas de animales. Para su sorpresa, observaron que las de un pez pulmonado africano y las de una salamandra gigante norteamericana, llamada anfiuma, albergaban docenas de veces más que las de los humanos, las ratas, las aves o los reptiles. A medida que se estudiaban más especies, resultó evidente que las salamandras y el pez pulmonado eran extraordinarios.

Durante las dos décadas siguientes, el análisis de los genomas gigantes avanzó de manera notable. En la Universidad de Leicester, Shigeki Mizuno y Herbert MacGregor estudiaron una familia norteamericana de salamandras, la de las pletodóntidas, cuyos miembros, de aspecto casi idéntico, tienen genomas que contienen de 18 a 55 gigabases, entre cinco y 16 veces el tamaño del genoma humano, de 3,06 gigabases.

En todos los seres vivos, la larguísima hebra de ADN está enrollada en varias madejas, los cromosomas. Pero en las especies con los genomas más grandes estos aparecen engrosados, como un globo alargado, inflado en exceso. El ADN extra parece esparcido a todo lo largo.

Mizuno y MacGregor no tenían ni idea de qué era todo aquel sobrante, pero a lo largo de la década de 1980 se descubrió que las células de otras especies, desde la mosca hasta el hombre, alberga ADN basura, fragmentos cortos de ADN llamados transposones que se asemejan vagamente a un virus. Como contienen genes que les permiten fabricar copias de sí mismos, acaban insertándose, a veces al azar, en otras partes del genoma celular.

Los avances en el estudio de los genomas gigantes se sucedieron con cuentagotas durante las décadas siguientes. Se dedicaron grandes esfuerzos para secuenciar el genoma de la mos-

ca del vinagre, el del ser humano e incluso el de un gusano, pero casi todos rehuían el de las salamandras, cuyo enorme volumen convertiría esa tarea en una pesadilla. Hasta que, en 2011, Rachel Mueller, bióloga evolutiva de la Universidad Estatal de Colorado, dio un gran paso.

Mediante técnicas de secuenciación ultrarrápida, ella y sus colaboradores analizaron cientos de miles de pedazos de ADN extraídos de seis tipos de salamandras pletodóntidas y de la salamandra gigante norteamericana, perteneciente a otra familia. Las sospechas se confirmaron: el genoma de todas estaba plagado de transposones. Las siete compartían muchos de ellos, lo que indicaba que esos transposones se habrían multiplicado sin control en el ancestro de todas las especies actuales, hace más de 200 millones de años.

La razón de esa explosión ha intrigado a Mueller desde entonces. «No es que [un transposón] perdiera la chaveta. Lo que hizo posible la multiplicación de docenas a la vez fue una transformación general del modo en que esas secuencias [los transposones] podían insertarse en el genoma», explica.

A pesar de que no ha descubierto la causa, sí ha resuelto otra incógnita: cuando los transposones proliferan en un genoma, con el tiempo suelen desaparecer por mutaciones al azar. Ese proceso ocurre sin cesar en todas las especies. Pero en dos estudios Mueller calculó que las salamandras se deshacen de ellos a un ritmo mucho más lento que el pez cebra o el hombre. Y eso inclina la balanza hacia la acumulación en lugar de mantener una cantidad más o menos constante, de modo que su genoma ha acabado rebosando con el tiempo. Todo ese ADN sobrante ha alterado profundamente el cuerpo, el cerebro y el corazón de estos anfibios. En las especies dotadas de los genomas más grandes, las deformaciones anatómicas saltan a la vista.

Un cerebro embrionario

El genoma gigante suele convertir a las salamandras en larvas agrandadas. De las 766 especies conocidas, más de 39 han perdido la facultad de metamorfosearse y pasar de la larva acuática al adulto terrestre, en tanto que otras 39 solo se transforman en ocasiones. El genoma de tales especies suele ser más grande que el de las que sí experimentan la metamorfosis. Al igual que el necturo del río Neuse, pasan toda la vida en el agua, con branquias juveniles y patas frágiles.

Muchas también están perdiendo dedos porque el desarrollo de las extremidades no llega a término. El necturo solo tiene cuatro en las patas posteriores, cuando la norma suele ser cinco. Las anfiumas tienen tres, dos o incluso uno solo en cada pie. Y los miembros de la familia de los sirénidos, habitantes del sudeste de EE.UU. y el nordeste de México, carecen en absoluto de extremidades posteriores.

Hasta las salamandras de hábitos terrestres y cuerpo de adulto conservan a menudo algunos rasgos juveniles, como huesos craneales no fusionados o partes del esqueleto del pie sin osificar. Una serie de descubrimientos acaecidos entre 1988 y 1997 mostró que muchas mantenían el cerebro en estado larvario.

Las revelaciones dieron comienzo cuando David Wake, renombrado especialista en estos anfibios de la Universidad de California en Berkeley, emprendió una colaboración con Gerhard Roth, entonces doctorando en la Universidad de Bremen. Decidieron comparar las estructuras cerebrales de docenas de ranas y salamandras pletodóntidas terrestres.

Wake extirpaba el cerebro de algunos ejemplares para examinarlos al microscopio, pero antes los sumergía en aceite de enebro americano, que los torna transparentes. A medida que avanzaron en su examen, se percataron de que la mayoría de ellos eran más simples que los de las ranas, parientes cercanas. El aspecto de las neuronas de la salamandra era «embrionario», explica Wake: grandes, redondeadas y menos diferenciadas en tipos especializados.

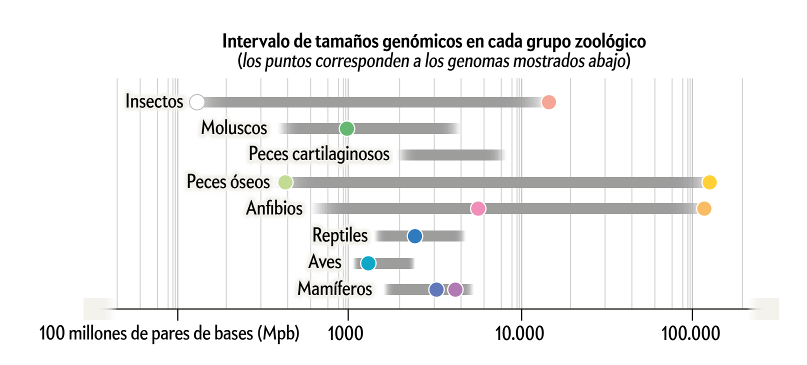
La simplificación era especialmente drástica en el sistema visual. El nervio óptico, que enlaza el ojo con el cerebro, no contenía más de 75.000 fibras nerviosas en las salamandras; el de una rana acoge hasta 470.000. La cantidad de fibras nerviosas recubiertas con vainas de mielina, que permiten que los impulsos nerviosos viajen más rápido, era mucho menor. Y en la región del cerebro donde se procesan las imágenes que llegan del nervio óptico, el tectum, las neuronas de las salamandras solían aparecer desparramadas, en desorden, algo propio de un cerebro embrionario o larvario; en cambio, en las ranas, esas células aparecían organizadas pulcramente en capas. Wake y Roth llegaron a la conclusión de que las salamandras de genoma grande poseían en general un sistema visual simplificado.

En todo esto, a Roth le sorprendió una pauta general: los rasgos ausentes del cerebro de

Caleidoscopio de genomas

El dipnoo jaspeado ostenta el récord de tener el mayor genoma de la fauna mundial (*aros de color, abajo*). El necturo del río Neuse, una salamandra rara, le sigue de cerca. El genoma humano (*aro morado*) se sitúa en el margen intermedio: es unas 43 veces más pequeño que el del dipnoo y 22 veces mayor que el de la mosca del vinagre. Los genomas de las aves presentan la variabilidad más reducida; los de los anfibios, la más extensa (*gráfica*).

El tamaño del genoma de los insectos y de los moluscos varía notablemente, pero en los vertebrados la variabilidad es aún mayor: es máxima en los peces óseos y los anfibios, y más reducida en los reptiles, las aves y los mamíferos.
El tamaño se mide en pares de bases, los ladrillos del ADN que forma los genes. El conjunto de los genes de un ser vivo constituye su genoma.



Tamaño del genoma de los animales indicados
(*aros dibujados a escala*)

10 Mbp

Dipnoo jaspeado, *Protopterus aethiopicus*: 130.000 Mbp

Necturo del Neuse, *Necturus lewisi*: 118.000 Mbp

Saltamontes de montaña, *Podisma pedestris*: 16.600 Mbp

Ranita de San Antón, *Hyla arborea*: 4760 Mbp

Zona ampliada

10.000 Mbp

Yubarta, *Megaptera novaeangliae*: 3628 Mbp

Ser humano, *Homo sapiens*: 3055 Mbp

«El genoma del perro y el del gato tienen un tamaño muy similar al humano»

Serpiente de jarretera, *Thamnophis sirtalis*: 2405 Mbp

Zorzal robín, *Turdus migratorius*: 1360 Mbp

Caracol, *Biomphalaria glabrata*: 930 Mbp

Pez globo, *Takifugu rubripes*: 390 Mbp

Mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*: 140 Mbp

ANIMAL GENOME SIZE DATABASE, 2021, T.R. GREGORY (*datos*); MARK BELAN (*gráfico*)

las salamandras se correspondían con los que suelen formarse más tarde en el desarrollo. Daba la impresión de que el cerebro no hubiera tenido tiempo de madurar del todo. Esta suposición era muy lógica porque otro investigador acababa de demostrar el vínculo entre el genoma de la salamandra y su desarrollo lento.

Stanley Sessions, antiguo estudiante de Wake (como otros expertos de este relato) y hoy catedrático emérito del Colegio Hartwick, estaba explorando la peculiar capacidad de estos anfibios para regenerar las extremidades: con ese fin amputó la extremidad posterior derecha de 27 especies de pletodóntidas y midió la rapidez con que crecía de nuevo en ellos. Su genoma varía entre 13 y 74 gigabases (entre 4 y 24 veces el genoma humano). Como era previsible, Sessions comprobó que la regeneración era más lenta en las especies de genoma más grande. Las células inmaduras tardaban más en diferenciarse en tipos especializados, como los que forman el músculo o el hueso.

Los estudios de Wake, Rot y Sessions también aportaron un argumento para entender por qué las salamandras dotadas de algunos de los genomas más grandes habían perdido dedos, las extremidades traseras e incluso la capacidad de metamorfosearse: su desmesurado genoma ha ralentizado y truncado numerosas facetas del desarrollo. Se supuso que ese desarrollo en suspenso era consecuencia del tiempo que tardaba en copiarse un genoma tan grande, y por eso las células se dividían más despacio. Pero en 2018, un nuevo hito en el campo de la genómica aportó una visión decisiva.

Ese año se publicó el primer genoma completo de una salamandra, el del ajolote mejicano. Este anfibio alcanza casi la longitud de un antebrazo, y entre sus rasgos juveniles destacan unas patas escuálidas y unas branquias plumosas, pero su genoma es de «solo» 32 gigabases, en contraste con las 118 del necturo. El estudio reveló que los transposones del ajolote no están desparramados sin más entre los genes, sino que abundan también en su interior, en unas regiones llamadas intrones. Este pequeño detalle tiene implicaciones enormes. Cuando un gen se activa, todo su ADN acaba copiado en una cadena de ARN, incluidos los intrones. Pero, antes de que esta cadena de ARN sirva de molde para la fabricación de las proteínas que dirigirán el crecimiento de la célula, es preciso recortar los intrones. Y los del

La pervivencia de estas salamandras demuestra que nuestra idea de la «supervivencia del más apto» está sesgada

ajolote son hasta 13 veces más largos que los humanos, porque están repletos de transposones. Eso hace que las cadenas de ARN tarden más en ensamblarse y que, por consiguiente, las instrucciones destinadas a la especialización de las células tarden más en ejecutarse; se demoran tanto que las salamandras «nunca maduran del todo», afirma Sessions.

El desarrollo lento es solo una parte del modo en que el genoma gigante distorsiona el cuerpo. Otra repercusión importante la descubrió la ciencia por casualidad hace más de 150 años, aunque su trascendencia ha pasado inadvertida hasta hace poco.

Un corazón de papel de liar

A inicios del siglo XIX, George Gulliver, un cirujano castrense británico, se interesó por la fauna en sus viajes por el mundo. En cada destino tomaba muestras de sangre de especies del lugar, las examinaba al microscopio y medía el tamaño de los glóbulos rojos. Estudió ciervos mejicanos, cocodrilos americanos, pitones indias, mielgas, anguilas eléctricas, armadillos y cientos de otros animales. Así descubrió que las células más grandes de todas eran las de la anfiuma tridáctila, cuyas patas vestigiales son tan diminutas que recuerda a una anguila. El volumen de sus glóbulos rojos multiplica por trescientos el de los humanos. Otras salamandras y un pez pulmonado iban a la zaga de ella en cuanto al tamaño celular.

Ahora sabemos que las dimensiones del genoma y de la célula van de la mano: a más ADN, más grande es esta. Y las células voluminosas influyen notablemente en la anatomía. Algunas salamandras han respondido creciendo hasta

alcanzar tallas realmente notables: la salamandra gigante china llega a 1,8 metros; las anfiumas, a 1,1 metros. El necturo del Neuse ronda los 28 centímetros, que sigue siendo el doble que la mayoría de las demás salamandras.

Las células grandes también comportan un cuerpo más sencillo. Imagine que está construyendo dos coches de juguete idénticos: uno con piezas pequeñas de Lego y otro con piezas grandes de Duplo. Si ambos tuviesen las mismas dimensiones, el coche fabricado con las piezas grandes sería más sencillo, más tosco. Ese es el aspecto del cuerpo de las salamandras.

James Hanken, ahora en la Universidad Harvard, descubrió el caso arquetípico de este fenómeno en los años 1980. Andaba estudiando los «huesos» del carpo (la muñeca) de las salamandras más pequeñas del mundo, que en realidad son cartílagos, dado que la osificación queda inconclusa. Estas especies del género *Thorius* habitan en rincones de los bosques montanos de México. Algunas son tan diminutas que caben en una moneda de veinte céntimos de euro. Docenas de especies afines poseen los mismos ocho huesos carpianos, pese a millones de años de evolución independiente. Pero Hanken descubrió que, en *Thorius*, una parte de esos huesos ancestrales se ha fusionado. Aún más sorprendente es que su disposición llega a variar en los individuos de una misma especie. Algunos solo tienen cuatro, otros hasta siete; los hay incluso que muestran diferencias de un carpo al otro.

Hanken califica de extraordinario ese grado de variabilidad. Cree que el cuerpo chico y las células grandes de *Thorius* le impiden literalmente poner en circulación la cantidad suficiente de ellas cuando los huesos carpianos se están formando en el embrión.

A Mueller y a su doctorando Michael Itgen les fascinó esa conclusión suya, de que las células voluminosas conducen a cuerpos simples. Pero se preguntaban si eso era realmente importante en estos anfibios. De modo que, en 2019, emprendieron un proyecto ambicioso con objeto de averiguar de qué forma la anatomía del corazón queda condicionada por las diferencias en la talla celular. Ambos estudiaron nueve especies de salamandras pletodóntidas, cuyos genomas contienen entre 29 y 67 gigabases.

Las pletodóntidas carecen de pulmones; respiran a través de la piel. Y, a diferencia de los mamíferos, su corazón posee un solo ventrículo, no dos. Itgen quedó asombrado de las notables diferencias que observó en los ventrículos mientras los examinaba al microscopio. En las especies de genomas más pequeños, esta cámara estaba formada por paredes gruesas y musculosas, con una cavidad pequeña para alojar la sangre. Pero, a medida que ascendía por la escala de los genomas, el ventrículo se adelgazaba y se ahuecaba cada vez más, hasta contener una cavidad amplia de paredes finas. En la especie con el mayor genoma, el ventrículo semejaba una bolsa vacía, formada por una fina lámina de músculo, del grosor de una célula.

Contemplar ese corazón fue como una revelación: «No concibo cómo puede funcionar algo así», confiesa Itgen, quien a finales de 2021 presentó con Mueller sus conclusiones en la revista *Evolution*.

Itgen no está seguro de por qué el genoma grande conduce a un corazón ahuecado. Especula con que el ventrículo sería más espacioso para dar cabida a los glóbulos rojos, que pueden modificar la viscosidad de la sangre. O tal vez el corazón no sea tan musculoso porque las células no se pueden dividir lo bastante rápido durante el desarrollo.

Sea como sea, esa débil constitución impone un alto precio. Adam Chicco, estudioso de la fisiología cardíaca en la Universidad Estatal de Colorado, ve paralelismos entre esos ventrículos de papel de liar y lo que se ve en los enfermos con insuficiencia cardíaca grave: células musculares escasas, estiradas hasta acabar más delgadas si cabe, cada vez menos capaces de bombear la sangre.

Si fuesen humanas, las salamandras estarían al borde de la muerte. «Tener un genoma grande no acarrea sino costes.» Y aun así, las salamandras han sobrevivido 200 millones de años. «Alguna ventaja debe de haber», me comentaba Wake en 2020. La búsqueda de esas ventajas ha deparado algunas sorpresas heréticas que podrían poner patas arriba nuestra perspectiva de la evolución.

Distorsiones profundas

Wake habló conmigo dos veces en 2020; falleció en abril de 2021. Pero para entonces, él y Sessions habían logrado al fin elaborar algo que durante décadas les había sido esquivo: una teoría sobre las ventajas que ese genoma desmesurado reportaría a las salamandras y al dipnoo.

La teoría fue el fruto de un experimento audaz. Sessions y Yuri Mataev, estudiante de grado, anestesiaron varios tritones orientales norteamericanos antes de despegar los finos colgajos del cráneo y extirparles casi una cuarta parte del cerebro, en concreto una región que interviene en el olfato. Que consigan regenerar una extremidad perdida es asombroso, pero Sessions quería poner a prueba los límites de esa facultad. Me dijo que «en seis semanas el cerebro se había rehecho por completo».

El experimento demostró que las salamandras son capaces de regenerar partes del cuerpo que normalmente no pierden en la naturaleza. Y eso contravenía un principio evolutivo básico: las aptitudes surgen como reacción a los factores ambientales adversos. Sessions sospecha que quizá la regeneración sea solo parte de la respuesta a tales factores, y que el genoma gigante ha acelerado la tendencia, como un efecto secundario que ha resultado ser ventajoso.

Ahora cree que el desarrollo lento provocado por los transposones insertos en los intrones podría dejar a las salamandras adultas bien surtidas de células inmaduras, que de ser necesario se diferenciarían en tejidos nuevos. «Las salamandras son esencialmente sacos andantes de células madre», afirma. Esta teoría que formuló con Wake, se publicó en junio de 2021, poco después del fallecimiento de este.

Jeramiah Smith, que investiga el genoma del ajolote en la Universidad de Kentucky, opina que a la idea no le falta «cierta verosimilitud», pero advierte de que la cuestión podría no ser tan sencilla, pues la vida limita el desarrollo de variadas formas cuando es ventajoso hacerlo. Ahora bien, con tantos transposones insertos en el genoma de la salamandra, es lógico que desempeñen algún papel. «La evolución opera con lo que tiene a mano», dice Smith.

De ser cierta, la teoría tendría repercusiones de peso. Hace décadas que la regeneración en las salamandras es objeto de estudio, con la esperanza de conseguir un día lo mismo con tejidos humanos. Pero si exige contar con gran cantidad de genes con intrones largos, podría ser una empresa muy difícil.

En un nivel más profundo, la teoría de Wake y Sessions refleja hasta qué extremo los parásitos genéticos han reprogramado la biología misma de las salamandras. Numerosas especies longevas, como la nuestra, mantienen reprimidas las células madre remanentes una vez que el desarrollo acaba. Se trata de una contrapartida de la evolución que reduce el riesgo, siempre presente, de que la división celular se desboque y degenere en cáncer. Siendo más numerosas, las células madre de las salamandras están mucho menos atadas.

La teoría de Wake y Sessions no explica del todo por qué estos anfibios toleran genomas de ese tamaño. Por útil que sea recuperar apéndices que se pierden en raras ocasiones, la salamandra ha de sobrevivir día a día con esas distorsiones tan singulares del corazón, el cerebro y el cuerpo en general. Esa paradoja señala una posibilidad sorprendente, que surgió en una conversación entablada por Mueller con Itgen y Hanken a mediados de 2021.

Los tres mantenían una teleconferencia en la que debatían el modo en que el corazón ahuecado afectaría a la supervivencia de las salamandras. «Adoptaré la postura extrema», dijo Hanken: es posible que ese corazón «no esté causando ningún efecto» en absoluto. Y por extraño que parezca, ese planteamiento tuvo sentido para Itgen y Mueller. Las salamandras crecen y se mueven con lentitud. Tienen, con diferencia, el ritmo metabólico más lento y las necesidades de oxígeno más reducidas de todos los vertebrados. Las pletodóntidas que estos estudian ni siquiera poseen pulmones. Así que es posible que se las apañen bastante bien con un ventrículo flácido, opina Itgen, «porque las demandas fisiológicas que recaen en el corazón son sumamente bajas».

Cuando Sessions llevó a cabo los citados experimentos de regeneración, también extirpó a una docena de tritones orientales la mitad de su único ventrículo. La sangre brotó a borbotones y el corazón cesó de latir, pero los individuos sobrevivieron y el ventrículo se regeneró, lo cual hace pensar que quizá el corazón no sea un órgano tan vital como lo es para un mamífero.

Las salamandras tampoco parecen estar pagando un precio sustancial por sus extraños esqueletos. Hanken cree que *Thorius* tolera los huesos carpianos sin endurecer porque las fuerzas que su cuerpo pequeño ejerce sobre las articulaciones son minúsculas. No precisa de las soberbias extremidades del guepardo porque no persigue a sus presas: se limita a permanecer quieta, a la espera de que algún insecto incauto quede a su alcance.

Roth añade que, si aguardan sin más a que las presas se acerquen, pueden simplificar el



EL NECTURO compensa la debilidad del corazón y los pulmones respirando a través de las branquias. A pesar de que sus células rebosan de ADN basura, se las ha apañado para sobrevivir.

ANDREW HETHERINGTON

sistema de visión entero. Los ejemplos más radicales en este sentido son las salamandras bolitoglosinas de Europa y el Nuevo Mundo. A este grupo pertenecen especies cuyos genomas son los más grandes de todos los animales terrestres, con hasta 83 gigabases (24 veces el genoma humano). Sus cerebros son también los más sencillos que Roth y Wake hubieran visto nunca en una salamandra. Por efecto de la simplificación han perdido entre el 50 y el 90 por ciento de las neuronas de la visión, de modo que son incapaces de distinguir un insecto que corretee ante ellas de una reluciente bolita de metal que pase rodando. Lo que sí poseen, en cambio, es una de las lenguas más rápidas del planeta, capaz de capturar un insecto en milisegundos: «Es como sin anduviesen por ahí con una pistola sin el fiador puesto», comparaba Wake.

Si uno tiene una lengua así, no necesita ver muy bien. Basta con poder permanecer inmóvil largo tiempo, y eso libra al cuerpo de mucha presión. Se puede tener un cerebro simplificado, un corazón flácido y unos huesos carpianos peculiares, «y no importa. Es algo significativo», razona Mueller.

Ironía cruel

Desde que quedó claro que las salamandras y el dipnoo poseen mucho más ADN que el ser humano, se ha debatido para qué puede servir. Al principio algunos adujeron que, además de contener la información, servía de soporte para delimitar las dimensiones del núcleo celular. Esa idea se ha quedado por el camino. La visión más reciente es más perspicaz.

Los transposones son, en efecto, ADN basura, asegura Ting Wang, estudiosa del genoma en la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en St. Louis. Pero esparcida por todo el genoma, esa basura se convierte en material útil para la evolución. A veces asume funciones legítimas. Los que aterrizan cerca de un gen pueden hacer que este se active más, por ejemplo. En 2021, Wang descubrió un transposón que activa un gen esencial para el embrión del ratón; si ese transposón se suprime,

muchos embriones mueren. Los transposones también desempeñan funciones estructurales, pues dividen el genoma en partes funcionales. «Ya no se pueden separar. Forman parte de nosotros», concluye Wang.

Y también pueden traicionarnos. Cuando el equipo de Wang analizó casi 8000 tumores humanos en 2019, comprobaron que, en la mitad, los transposones se estaban convirtiendo en oncogenes clave que estaban impulsando el crecimiento explosivo del cáncer.

De todo lo anterior se deduce que, aunque el anfitrión a veces logra controlar a los transposones, estos no tienen una finalidad inherente. «No todo obedece a la adaptación», matiza T. Ryan Gregory, biólogo e investigador del tamaño del genoma en la Universidad de Guelph, Ontario. El ADN también actúa en interés propio: no solo evoluciona para mejorar las posibilidades de supervivencia del portador, sino para mejorar las suyas, y al portador "que le parta un rayo".

Al tiempo que el anfitrión lucha por mantener su nicho en el mundo, en sus células se desarrolla otra lucha igual de dramática. Los transposones compiten por colonizar el genoma y evadir las defensas de la célula. «Estamos comenzando a ver el genoma como una comunidad ecológica, y los elementos transponibles como especies», afirma Mueller.

La tendencia a la multiplicación de los transposones significa que cualquier genoma tiende a crecer con el tiempo. A semejanza de los trastos que se guardan en el garaje, el ADN se va acumulando hasta ocupar todo el espacio disponible. Y es la presión de la selección natural, que te penaliza cuando tu genoma es demasiado voluminoso, la que lo mantiene dentro de un determinado margen en la mayoría de los seres vivos. Según Gregory, existen pautas que rigen el tamaño. La carga de ADN que una especie es capaz de tolerar depende de la velocidad del desarrollo, del ritmo metabólico y del modo de vida.

Con su metabolismo acelerado y la energía que exige el vuelo, las aves no pueden mantener una gran cantidad de ADN. El genoma aviar es más pequeño que el de la mayoría de los mamíferos, de entre 0,89 y 2,11 gigabases; compárense con las 3,06 gigabases de los humanos. En los mamíferos, 19 de los 20 genomas más pequeños pertenecen a murciélagos, con demandas similares a las de las aves.

La carga de ADN que una especie es capaz de tolerar depende de la velocidad del desarrollo, del ritmo metabólico y del modo de vida

El ser humano es un término medio dentro de los mamíferos, probablemente como consecuencia de factores contrapuestos. Crecemos poco a poco, pues tardamos casi 20 años en alcanzar la madurez, lo que implica que debemos tener bastante capacidad para cargar con ADN extra. Aun así, el tamaño de nuestro genoma podría estar en el filo de la navaja, mantenido bajo control por otro factor crítico: la capacidad intelectual de la que depende nuestra supervivencia. Suzana Herculano-Houzel, neurocientífica de la Universidad Vanderbilt, opina que la gran inteligencia del ser humano y de otros primates se explica por el tamaño relativamente pequeño de las neuronas, que permite alojar muchísimas en la corteza cerebral. Si su teoría está en lo cierto, un genoma más grande nos dejaría con menos neuronas, y no seríamos tan inteligentes.

Las ranas y los sapos, parientes cercanos de las salamandras, poseen genomas relativamente grandes, de hasta 13,1 gigabases de ADN. Pero la rana excavadora *Platyplectrum ornatum*, cuyo genoma se publicó en 2021, solo tiene 1,06 gigabases, similar al de un colibrí. Habita en el desierto de Australia, donde hace la puesta en las charcas efímeras que se forman con las escasas lluvias, de modo que los renacuajos disponen de pocos días para desarrollar las patas antes de que el agua se evapore; no pueden permitirse el lujo de acumular desechos genómicos. Incluso entre las plantas, las malas hierbas que con tanta rapidez se propagan en los campos y los terrenos baldíos (cardos, dientes de león y similares) acostumbran a tener

un genoma más pequeño que otras especies de crecimiento más lento a las cuales desplazan.

El genoma de la salamandra probablemente creció de forma gradual, en contraste con las especies simples y eficientes. Gregory y Mueller creen que hace 200 millones de años, el ancestro de todas las especies actuales probablemente tomó la senda lenta de la vida y se decantó por un escaso gasto de energía y un desarrollo pausado. Los efectos negativos de la acumulación de los transposones no se hicieron notar de inmediato. Pero a medida que el genoma iba creciendo, empujó a estos anfibios hacia nichos donde la estrategia de ser lento y frugal compensaba.

En un artículo publicado en 2020, Gregory plantea que este proceso acabó desembocando en un punto de inflexión: los transposones pasaron de ser meros ocupantes del espacio genómico a convertirse en verdaderos organizadores del mismo. Cuando un transposón inserta una nueva copia de sí mismo siempre corre el riesgo de que altere para mal un gen, algo nada bueno si se es un parásito que depende del anfitrión para sobrevivir. Si el recién insertado provocase esterilidad, por ejemplo, no se transmitiría a la generación siguiente. Pero a medida que los transposones se multiplicaban, su sola presencia ofreció más lugares propicios en el genoma para que los siguientes se incorporasen sin dañar los genes. «Es un bucle de retroalimentación. Cuantos más transposones tienes, más puntos seguros de inserción tienes a tu disposición», explica Gregory.

Y es así cómo el necturo del Neuse acabó llevando a cuestas 118 gigabases de ADN. Una especie hermana, el necturo enano (*N. punctatus*), le sigue muy de cerca, con 117 gigabases.

Es fácil sentir una pizca de compasión cuando se contempla un necturo. El lento desarrollo no solo le impide completar la metamorfosis, sino también regenerar las extremidades en la edad adulta, una ironía cruel. Incapaz de adentrarse en la tierra firme, permanece aislado en dos pequeñas cuencas fluviales de Carolina del Norte. La agricultura y el desarrollo urbanístico han degradado la calidad del agua. Con la población en declive, el Gobierno de EE.UU. lo incluyó en la lista de especies amenazadas en junio de 2021. Aunque las salamandras han sobrevivido como grupo durante 200 millones de años, resulta tentador pensar que el genoma gigante de esta especie la ha abocado a la extinción.

Sessions no está tan seguro. Estos anfibios rebosantes han demostrado, una y otra vez, que cuando se trata de la supervivencia de los más aptos, nuestro concepto de «aptitud» está sesgado hacia la fuerza y la agilidad. Los parásitos genómicos del necturo han frenado su desarrollo, han hinchado sus células y distorsionado su anatomía, circunstancias extrañas que lo han empujado hacia una singular vía lateral evolutiva que redefine la aptitud, hasta tal punto que el corazón y el cerebro complejo quedan reducidos a una ocurrencia. Pero, de alguna manera, el linaje ha pervivido resistiendo los incendios, las inundaciones y los asteroides que borraron del mapa a otros animales, con pelo, con plumas y con escamas, que parecían mejor adaptados.

«Las salamandras son supervivientes natas», concluye Sessions.

Douglas Fox escribe sobre biología, geología y climatología. Es colaborador de *New Scientist, Discover* y *Christian Science Monitor*, entre otras publicaciones, y ha recibido numerosos premios, como el de la Sociedad Americana de Periodistas y Autores.



EN NUESTRO ARCHIVO

Regeneración de las extremidades. Ken Muneoka, Manjong Han y David M. Gardiner en en *IyC*, junio de 2008.

La función reguladora del genoma. Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo en *IyC*, diciembre de 2013.



PSICOLOGÍA

LAS TRAMPAS DEL PENSAMIENTO IMPULSIVO

Carmen Sánchez y David Dunning | Las personas que sacan conclusiones precipitadas son más propensas a creer en teorías conspirativas, confían demasiado en sí mismas y cometen otros errores de razonamiento

ISLENIA MILIEN

¿Cuánto tiempo dedica a indagar antes de tomar una decisión importante? Para muchos de nosotros la respuesta parece ser «casi nada». Antes de comprar un coche, por ejemplo, la mayoría de la gente va como máximo dos veces al concesionario. Y según un análisis publicado en *Health Services Research*, a la hora de elegir médico, muchas personas se limitan a seguir las recomendaciones de amigos y familiares en lugar de consultar a profesionales de la salud o fuentes externas, como sitios web especializados o artículos sobre buenos profesionales.

Y no es precisamente porque estemos reservando nuestros recursos mentales para decisiones de más calado. Uno de cada cinco estadounidenses dedica más tiempo a planear las vacaciones que a su futuro financiero. Algunas personas repasan cada detalle de manera minuciosa antes de tomar cualquier decisión, y desde luego es posible dar demasiadas vueltas a las cosas, pero bastante gente saca enseguida conclusiones precipitadas. A ese proceso de razonamiento los profesionales de la psicología lo llaman sesgo cognitivo: la tendencia a cometer un error mental específico. En este caso, el error consiste en tomar una decisión basándose en pruebas objetivas casi inexistentes.

En nuestras investigaciones hemos averiguado que, por lo general, los juicios apresurados son solo un elemento más de patrones más amplios de la conducta y del pensamiento proclives al error. Y estos patrones tienen un precio. Las personas que sacan conclusiones precipitadas en su razonamiento suelen apostar por opciones con menos probabilidades de éxito en detrimento de otras más ventajosas.

Con el fin de estudiar esa forma de actuar, hemos analizado los patrones de toma de decisiones de más de 600 personas de la población general. Como gran parte de la investigación sobre este tipo de sesgo proviene de los estudios sobre la esquizofrenia (la impulsividad en la toma de decisiones es habitual en las personas con ese trastorno), empleamos un juego intelectual que suele utilizarse en esta área de investigación.

Los jugadores se encuentran con una persona pescando; puede ser que esté en un lago donde la mayoría de los peces sean rojos o en otro en el que sean plateados. El pescador va sacándolos de uno en uno y se detiene cuando los jugadores piensan que ya pueden saber en cuál de los dos lagos está pescando. Algunos jugadores necesitaban ver muchos peces antes de decidir. Otros, los apresurados, paraban con uno o dos.

También formulamos preguntas a los participantes para saber más sobre sus patrones de pensamiento. Averiguamos que, cuantos menos peces veía un jugador, más errores cometía en otros tipos de creencias, razonamientos y decisiones.

Un ejemplo: cuanto más se apresuraba una persona a decidir de qué lago se trataba, más proclive era a dar crédito a teorías conspirativas, como que la llegada a la Luna de las misiones Apolo fue un montaje. También eran más propensas a creer en fenómenos paranormales y en bulos médicos, como que las autoridades sanitarias están ocultando deliberadamente la relación entre los teléfonos móviles y el cáncer.

Los más impulsivos en el juego del lago cayeron en más errores que las personas más pausadas en la resolución de problemas que requerían un análisis reflexivo. Veamos este acertijo: «Un bate y una pelota de béisbol cuestan 1,10 dólares en total. Si el bate cuesta 1 dólar más que la pelota, ¿cuánto cuesta la pelota?». Muchos participantes se apresuraron a contestar que costaba 10 centavos, pero, si pensamos un poco, vemos que la respuesta correcta es 5 centavos (así es, piénselo con detenimiento).

En una tarea de juegos de azar resultó más fácil atraer hacia opciones con menos probabilidades de ganar a las personas tendentes a la precipitación. En concreto, cayeron en la trampa de fijarse en las veces que podía producirse un resultado satisfactorio en lugar de en todos los demás resultados posibles.

En síntesis

Las personas impulsivas en sus decisiones pecan de exceso de confianza y no suelen ser tan acertadas como las más reflexivas.

En el cerebro parece existir un sistema derazonamiento más intuitivo y rápido, al cual secontrapone otro sistema más analítico y meditado.

La impulsividad cognitiva caracteriza algunos trastornos mentales, como la esquizofrenia.

Las personas impulsivas en el juego del lago también incurrían en un exceso de confianza: en un cuestionario sobre civismo, sobreestimaron la probabilidad de que sus respuestas fuesen correctas en un porcentaje significativamente superior al de otros participantes, incluso en los casos en que sus respuestas eran incorrectas.

Las diferencias en la calidad de las decisiones que tomaban los impulsivos y los reflexivos persistieron aun después de introducir en la ecuación las diferencias en cuanto a personalidad e inteligencia, esta última estimada mediante una prueba de inteligencia verbal. Además, según nuestros datos, esa diferencia tampoco se explicaba únicamente porque las personas más apresuradas hicieran las tareas planteadas demasiado rápido.

Entonces, ¿qué hay detrás de la toma precipitada de decisiones? Los investigadores del ámbito de la psicología suelen distinguir dos itinerarios de pensamiento: uno automático, llamado sistema 1, que refleja las ideas que nos vienen a la mente de manera espontánea y sin esfuerzo; y otro controlado, denominado sistema 2, que consiste en un razonamiento consciente que demanda esfuerzo, es analítico y deliberado.

En nuestra investigación usamos varias evaluaciones para discernir hasta qué punto las respuestas de los participantes eran automáticas y en qué medida eran fruto de un análisis meditado. Descubrimos que tanto los que se precipitaban como los que no se dejaban llevar por pensamientos automáticos (sistema 1). En cambio, los apresurados no recurrían tanto al razonamiento controlado (sistema 2) como los reflexivos.

Por tanto, ese sistema 2 ayuda a contrarrestar la contaminación mental y otros sesgos que introduce el sistema 1, más intuitivo. Dicho de otra forma, quienes toman decisiones precipitadas tienden más a aceptar las conclusiones que sacan a bote pronto sin someterlas a escrutinio o a un análisis deliberativo. La menor preponderancia del segundo sistema de pensamiento también presenta otro tipo de nexos más generales con las creencias equivocadas y los fallos de razonamiento de tales personas.

Por suerte, hay esperanza para los "fitipaldis": nuestras investigaciones indican que ciertos tipos de entrenamiento enfocados a trabajar los sesgos ayudan a meditar más las cosas. En concreto, hemos tomado del campo de la esquizofrenia un método llamado entrenamiento metacognitivo con el que hemos creado una versión adaptada en línea que se ajusta al ritmo de cada usuario. En este entrenamiento, el participante tiene que hacer frente a sus propios sesgos. Por ejemplo, como parte del método, pedimos a los usuarios que resuelvan acertijos y, cuando cometen errores relacionados con sesgos específicos, se les señalan esos fallos para que puedan saber más sobre sus pasos en falso y aprendan nuevas formas de abordar el problema. Este tipo de intervención también ayuda a frenar el exceso de confianza del usuario.

La intención es seguir con esta investigación hasta descubrir otros problemas generados por la toma precipitada de decisiones. También nos preguntamos si ese sesgo cogni-

Un bate y una pelota de béisbol cuestan 1,10 dólares. Si el bate cuesta un dólar más que la pelota, ¿cuánto cuesta la pelota?

Una pista: no son 10 centavos, aunque muchos se precipiten y den esa respuesta

tivo ofrece beneficios que expliquen por qué es tan común. Y, como parte de ese proceso, queremos devolver al campo de la investigación sobre la esquizofrenia todo lo que nos ha aportado. En algunos estudios, hasta dos tercios de las personas esquizofrénicas que manifiestan haber sufrido delirios dan muestras de un sesgo de precipitación en la resolución de problemas de probabilidad sencillos y abstractos; en la población general solo una de cada cinco personas presenta tal sesgo.

La esquizofrenia es un trastorno relativamente infrecuente y todavía no se comprende muy bien la relación que existe entre la toma precipitada de decisiones y los problemas de criterio. Nuestros trabajos realizados en la población general, podrían contribuir a llenar ese vacío y ayudar así a las personas con esquizofrenia.

En nuestro día a día es habitual, e importante, que nos preguntemos si conviene pensar detenidamente las cosas o seguir nuestra intuición. Varios estudios recientes indican que recopilar aunque solo sea un poquito más de información ayuda a evitar errores de bulto. A veces, la decisión más importante puede ser simplemente dedicar algo más de tiempo a decidir.

Carmen Sánchez es profesora adjunta en la Escuela de Negocios Gies de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Estudia la formación de falsas creencias, la toma de decisiones y el exceso de confianza.



David Dunning es psicólogo social y catedrático de psicología en la Universidad de Míchigan. Su investigación se centra en los aspectos psicológicos de las falsas creencias, en concreto de las que tenemos sobre nosotros mismos.



EN NUESTRO ARCHIVO

Psicología de las preferencias. Daniel Kahneman y Amos Tversky en *IyC*, marzo de 1982.
Riesgos del razonamiento intuitivo. Gabriel Uzquiano en *IyC*, enero de 2013.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, Vegetación adaptada al desierto y El genoma gigante de las salamandras*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes*; **Miguel A. Vázquez-Mozo:** *El origen del espacio y del tiempo;* **Laura Carasusán:** *Las trampas del pensamiento impulsivo*; **Alfredo Marcos:** *Individualidad y simbiosis*; **Lorenzo Gallego:** *Los secretos de los papiones sagrados*; **Anna Romero:** *Los beneficios de reciclar la orina*; **Javier Grande:** *La conjetura de Collatz.*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

INDIVIDUALIDAD Y SIMBIOSIS

Javier Suárez | ¿Son realmente los microbios agentes externos o son parte esencial de nuestra naturaleza?

Cuando pensamos en bacterias o en cualquier otro tipo de microorganismos (virus, hongos, etcétera), tendemos a concebirlos intuitivamente como agentes externos que causan enfermedades, epidemias, malas cosechas u otros efectos por lo general adversos. Por ejemplo, sabemos que el bacilo de Koch es el responsable de la tuberculosis, que el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) causa el sida, y el SARS-CoV-2, la COVID-19, y que el hongo *Plasmopara viticola* (conocido como mildiu) daña gravemente las cosechas de vid. Para escapar del poder destructor de los microbios, nos lavamos las manos antes de entrar en contacto con alimentos, desinfectamos con cuidado cortes y heridas y fumigamos las plantas con diversos productos. Pero, ¿resulta todavía válida esta concepción de los microorganismos como algo externo y dañino, o cabe una visión más amplia e inclusiva que los considere partes de lo que somos como humanos? Y, sobre todo, ¿en qué se diferencian, desde el punto de vista filosófico, estos dos enfoques?

Nuestra imagen negativa de los microorganismos proviene de la investigación médica llevada a cabo en el siglo XIX. En concreto, de la teoría microbiana de la enfermedad derivada de los trabajos de Louis Pasteur y Robert Koch. Según esta, los microorganismos serían la causa de las enfermedades, así como de otros procesos de descomposición hasta entonces atribuidos a la generación espontánea. Desde ese momento, microorganismo, enfermedad y descomposición quedarían indisociablemente unidos, lo que abona una visión de los microbios como agentes externos a nuestra naturaleza humana y que nos causan daños.

Sin embargo, esa visión derivada de la medicina contrasta con la que sugiere la observación de la simbiosis, cuya investigación comenzaba a tomar cuerpo hacia finales del mismo siglo. La simbiosis es el fenómeno biológico por el cual dos o más individuos de diferentes especies conviven entre sí durante la práctica totalidad de su ciclo biológico. Uno de los primeros casos descritos de simbiosis corresponde a los líquenes, organismos compuestos por un alga y un hongo y que forman estructuras morfofisiológicas que se asemejan tanto a las de un organismo autónomo que habían confundido a los biólogos durante decenios. Tal era la situación que, ya en 1868, una vez descubierta la naturaleza simbiótica del liquen, el biólogo Si-


SHOSHANAH DUBINER, WWW.CYBERMUSE.COM

***Endosimbiosis: Homenaje a Lynn Margulis,* pintura de Shoshanah Dubiner, 2012.**

mon Schwendener afirmaría: «Los organismos [que componen el liquen] están tan intrínseca y recíprocamente conectados que constituyen una nueva planta con una clara individualidad propia a través de su interpenetración».

Lo más interesante de esa «interpenetración» o fusión entre organismos simbióticos es que se puede llegar a generar un grado de integración tan elevado que eventualmente lleve a la aparición de una forma emergente de individualidad biológica con capacidad de evolución autónoma. Dicho de otra manera, es posible que el conjunto de los simbiontes acumule rasgos o adaptaciones características del conjunto, y no de cada una de las especies que lo componen, a lo largo de su historia evolutiva. Esta arriesgada hipótesis, cuyas raíces históricas pueden encontrarse en la biología de las últimas décadas del siglo XIX, fue fervientemente defendida en los siglos XX y XXI por la bióloga Lynn Margulis. Ella creía que la simbiosis constituía el gran motor de la evolución biológica y postuló la hipótesis —hoy día ampliamente aceptada por la comunidad científica— de que las células eucariotas o nucleadas serían un producto de la fusión simbiótica entre dos organismos previamente independientes: a saber, una bacteria y una arquea.

No contentándose con ello, entre los años noventa del pasado siglo y la primera década de 2000, Margulis generalizaría su hipótesis y defendería que la simbiosis habría sido, asimismo, el motor que dio origen a gran parte de las especies biológicas que habitan hoy nuestro planeta. En este contexto, acuñaría el término *holobionte* para referirse a la unidad de organización biológica compuesta por un huésped (animal, planta, hongo u otra célula) y sus simbiontes (primariamente, bacterias u otros microorganismos). Cabe destacar que esta definición incluiría a todos los simbiontes que conviven con un huésped, con independencia de los efectos sobre su eficacia biológica. Es decir, los simbiontes mutualistas son parte del holobionte, así como también lo son los parásitos y los comensalistas, siempre que la relación entre las partes se prolongue durante un período de tiempo no despreciable en relación a su ciclo biológico.

Esta última hipótesis de Margulis ha recibido un apoyo empírico esencial en el último decenio. En concreto, con el descubrimiento de la emergencia simbiótica de ciertas variedades fenotípicas muy acusadas y en ocasiones implicadas directamente en la existencia de separación entre especies o incluso géneros enteros. Uno de los estudios más pioneros en esta línea está encabezado por Robert M. Brucker, de la Universidad Harvard, y Seth R. Bordenstein, de la Universidad Vanderbilt,

quienes demostraron que el fenómeno conocido como «incompatibilidad híbrida» (según la cual los híbridos no llegan a desarrollarse como organismos adultos) puede ser revertida entre ciertas especies de las avispas *Nasonia* si los huéspedes son tratados con antibióticos para eliminar por completo su microbioma. Ello sugiere que la barrera entre algunas especies puede ser un fenotipo emergente de la interacción entre huésped y su microbioma, en vez de fruto de incompatibilidades intragenómicas en el propio huésped, como se había considerado tradicionalmente.

Otro ejemplo empírico surge del estudio liderado por M. Lisandra Zepeda Mendoza, en la actualidad en la Universidad de Birmingham, sobre la evolución de la dieta estrictamente hematófaga en murciélagos vampiros. En este caso, el genoma de los murciélagos carece de la mayor parte de la información que permite dar las respuestas sistémicas necesarias para sobrevivir con este tipo de dieta. Sin embargo, el microbioma de estos murciélagos es tan altamente especializado y característico que permite su supervivencia sin demasiados problemas. En este caso, los murciélagos se habrían aprovechado del alto poder «químico» de las bacterias para explorar una nueva vía de alimentación, generándose una unidad evolutiva emergente, u holobionte, que la selección natural se habría encargado de «perfeccionar» con el tiempo.

Desde una perspectiva estrictamente filosófica, todos estos descubrimientos tienen una importancia capital para repensar algunas nociones fundamentales de la filosofía de la ciencia y la naturaleza actuales. Así, los filósofos John Dupré y Daniel Nicholson, de la Universidad de Exeter, han argumentado que la generalidad del fenómeno de la simbiosis supone un apoyo empírico fundamental en favor de una ontología de procesos sobre una ontología de sustancias.

Una ontología de sustancias, argumentan, presupone que hay organismos con esencias relativamente fijas o invariables, y que lo que cambia serían sus «accidentes». Dicho de otro modo, es una ontología que toma lo estable o no cambiante como primitivo, y trata de explicar el cambio en virtud de alteraciones en los accidentes de las sustancias existentes. En este contexto, un accidente es aquello que se predica de múltiples sustancias sin ser necesario para la existencia de ninguna de ellas en particular. Por ejemplo, la rojez de un colirrojo tizón es un accidente, pues organismos de más especies pueden ser rojos, y puede haber colirrojos tizones sin rojez (por ejemplo, los ejemplares juveniles). Las propiedades esenciales, por el contrario, son aquellas que no pueden dejar de predicarse de un objeto sin que este deje de ser lo que es. Por ejemplo, para un esencialista genético, el genoma sería una propiedad invariable de los colirrojos, pues de cambiarse este, el objeto en cuestión dejaría de ser un colirrojo. Para un esencialista de origen, descender de un colirrojo es algo invariable de todo colirrojo, al margen de que el genoma pueda verse alterado. Dupré y Nicholson creen que toda ontología de sustancias, por su énfasis en la invariabilidad, presupone necesariamente alguna forma de esencialismo.

Una ontología de procesos, por el contrario, toma el cambio como primitivo, y explica la estabilidad en virtud de dicho cambio. En este escenario, los organismos no tendrían esencias fijas, sino que estas vendrían determinadas de continuo por las interacciones que se establecen, y la «estabilidad» no sería sino el reflejo de dichas interacciones, que necesariamente implican un cambio continuo. La simbiosis, con su énfasis en la interacción entre especies como definitoria de lo que cada organismo es, favorecería una visión procesual del mundo biológico, en que lo «estable» lo es solo en apariencia, derivado de un primitivo más fundamental que vendría marcado por la continua interacción y el continuo cambio que tal interacción implica entre los organismos de diferentes especies. Nótese que, en este contexto, el argumento de Dupré y Nicholson va a la vez a favor de una ontología de procesos y en contra del esencialismo biológico.

La generalidad e importancia de la simbiosis abre también una perspectiva radicalmente nueva a la hora de concebir el concepto de individualidad biológica. Ello da lugar a lo que los biólogos Scott F. Gilbert y Alfred I. Tauber denominan el «holobionte/individuo dialéctico» y los filósofos Adrian Stencel, de la Universidad Jaguelónica de Cracovia, y el propio autor de este artículo denominan la visión parte-dependiente de la (multi-)individualidad biológica.

Para entender en qué consisten estas ideas, es necesario revisar la concepción tradicional de la (multi-)individualidad biológica. El contexto teórico tradicional —aunque no el único— para entender la individualidad es el de

la evolución de adaptaciones biológicas en los diferentes niveles jerárquicos de organización biológica. Por ejemplo, se dice que un organismo pluricelular, como un mamífero, es un individuo biológico porque es posible que evolucionen adaptaciones claras en dicho nivel. Una asunción no siempre explícita de esta visión más tradicional de la individualidad biológica es que las partes que componen la totalidad mantienen entre sí relaciones de dependencia simétricas. Esto es, cada una de las células que componen el cuerpo del mamífero dependen mutuamente entre sí, de manera tal que lo que le ocurra a la primera puede afectar a la segunda, y viceversa. Sin embargo, los organismos de un ecosistema no establecen entre sí relaciones de dependencia simétrica, debido a la gran cantidad de interacciones y posibilidades de que disponen, por lo que un ecosistema no es un individuo biológico. Esta concepción de la individualidad biológica se generaliza a diferentes contextos teóricos: el contexto inmunológico, el fisiológico, el de la biología del desarrollo, el evo-devo, etc.

Stencel y quien escribe estas líneas denominan «toti-dependiente» a esta visión tradicional de la individualidad, ya que esta se define siempre —y al margen del contexto teórico que se esté tratando— en virtud de relaciones de simetría entre todas las partes. A ella se opone una perspectiva «parte-dependiente», que deriva fundamentalmente de su estudio de la simbiosis. Esta última tiene dos peculiaridades.

Primero, la individualidad biológica debe pensarse de diferente manera en distintos marcos teóricos. No es lo mismo la pregunta acerca de la individualidad evolutiva que acerca de la individualidad fisiológica, por poner dos ejemplos. Esta visión es aceptada hoy día por la mayor parte de los estudiosos de la individualidad biológica.

Segundo, la determinación de que una totalidad sea un individuo debe depender de las relaciones de dependencia biológica (fisiológica, evolutiva, etcétera) que una parte privilegiada de tal totalidad mantenga con otras partes, al margen de si tales relaciones de dependencia son recíprocas. Esta visión es más revolucionaria, pues socava un aspecto fundamental del modo en que tradicionalmente se había pensado la ontología de la individualidad biológica.

Nótese que la segunda de las asunciones encaja a la perfección con lo que ocurre en muchos holobiontes. En estos, el huésped establece en general relaciones de dependencia con su microbioma que no son recíprocas, pues los microorganismos del microbioma pueden, en general, habitar en ambientes muy diversos no limitados a la especie de su hospedero. Según Stencel y el autor de esta columna, el pensamiento holobióntico o simbiótico deriva fundamentalmente de esta visión parte-dependiente de la individualidad biológica.

Volvamos a la pregunta que da título al artículo: ¿son los microbios agentes externos o son parte esencial de nuestra naturaleza? Las pruebas empíricas sugieren que es incorrecto creer que la mayoría de los microbios que habitan en nuestro cuerpo son algo meramente externo. Al contrario, la mayoría de ellos establece un equilibrio biológico estable con sus huéspedes que ha resultado esencial para que estos hayan evolucionado como lo han hecho, y que es, además, fundamental para mantener su salud. Solo queda ahora explorar empíricamente las implicaciones de este cambio filosófico fundamental en nuestro modo de entender el mundo vivo, para así poder llegar a comprender la potencia real de esta nueva perspectiva.

Javier Suárez es profesor lector de filosofía en la Universidad de Oviedo. Centra su trabajo en el estudio filosófico de las ciencias de la vida.



PARA SABER MÁS

Planeta simbiótico. Lynn Margulis. Debate, 2002.

The hologenomic basis of speciation: Gut bacteria cause hybrid lethality in the genus *Nasonia*. Robert M. Brucker y Seth R. Bordenstein en *Science*, vol. 341, págs. 667–669, julio de 2013.

Rethinking individuality: The dialectics of the holobiont. Scott F. Gilbert y Alfred I. Tauber en *Biology and Philosophy*, vol. 31, págs. 839-853, octubre de 2016.

Everything flows: Towards a processual philosophy of biology. Daniel J. Nicholson y John Dupré. Oxford University Press, 2018.

A part-dependent account of biological individuality: Why holobionts are individuals and ecosystems simultaneously. Javier Suárez y Adrian Stencel en *Biological Reviews*, vol. 95, págs. 1308-1324, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Qué es un organismo individual? Arantza Etxeberría en *IyC*, mayo de 2013.

Simbiosis microbianas. Jeffrey Marlow y Rogier Braakman en *IyC*, junio de 2019.

FORO CIENTÍFICO

UNA LEY INSUFICIENTE PARA LA CIENCIA ESPAÑOLA

Aurelia Modrego y Clara Eugenia Núñez | La reciente propuesta no aborda los urgentes cambios que necesita el sistema científico y tecnológico de nuestro país

El pasado febrero, el Consejo de Ministros aprobó el anteproyecto de Ley de la Ciencia, que modifica la norma vigente, de 2011. A nuestro entender, la reforma adolece de serios problemas de fundamento y objetivos. Ni en la exposición de motivos ni en el articulado se percibe que sea la ley que este país necesita para impulsar el avance científico e innovador que contribuya a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. El Gobierno insiste en que para su elaboración ha consultado a expertos de distintos foros, academias (como la Confederación de Sociedades Científicas de España, o COSCE), universidades y otros organismos públicos de investigación. Pero tal ejercicio resulta vano, ya que no se trata de aceptar medidas aisladas, sino de entender cuál debe ser el diseño de un buen marco institucional, equiparable a escala internacional, que fomente la ciencia y la innovación. Deben tomarse las medidas necesarias para hacerlo posible, como le llevan pidiendo estos y otros interlocutores desde hace años. La propuesta de ley no lo hace.

El anteproyecto se basa en un diagnóstico incompleto de la grave situación que arrastra el Sistema Español de Ciencia, Tecnología e Innovación, en el que solo se detectan en tres cuestiones clave: la carrera y desarrollo profesional del personal investigador; la transferencia del conocimiento a la sociedad, y la gobernanza del sistema y la coordinación y colaboración dentro de él. Se pretende resolverlas mediante una normativa asfixiante, impropia de una ley del siglo XXI. Si bien podría enmendar los problemas coyunturales de la carrera investigadora, no remedia las grandes trabas y dificultades que minan al sistema.

Pensamos que las carencias en las que se centra el anteproyecto no son las únicas ni las más importantes. En primer lugar, el articulado sobre la carrera investigadora es excesi-



ISTOCK/ NUTHAWUT SOMSUK

La ciencia española sufre desde hace tiempo profundas carencias. Sin un marco legal que le garantice recursos, herramientas y estrategias no saldrá del atolladero.

vamente prolijo e inadecuado para una ley; se asemeja a una carrera de obstáculos burocráticos que frenan la creatividad y la curiosidad, actitudes imprescindibles para investigar e innovar. La creación, la captación y la retención del talento no se consideran una prioridad. De hecho, ocupan el último lugar de los diecisiete objetivos generales de la ley, el único en que se menciona el talento. La propuesta de ley impide captar y retener a los mejores, sin los cuales no hay ciencia.

En cuanto a la transferencia a la sociedad del conocimiento y los resultados de la actividad investigadora, la nueva ley se limita a actualizar la normativa vigente. Una vez más, se olvida de hacer una valoración de las ahora resucitadas oficinas de transferencia de resultados de investigación y del esfuerzo que se hizo con los parques científicos y tecnológicos. Es evidente que sin conocimiento ni cooperación no hay transferencia. Ello requiere un marco institucional educativo y científico adecuado que fomente el intercambio de talento e ideas en todos los ámbitos, públicos y privados. Diversos informes de la UE señalan la necesidad de priorizar la calidad científica frente a la cantidad, con una mayor orientación de la educación y la investigación a la resolución de problemas y a la colaboración. La propuesta de ley no favorece un entorno de colaboración y confianza entre los científicos y la sociedad, en especial las empresas.

Por lo que respecta a la gobernanza del sistema, la ley destaca la relevancia de la política científica como una de las políticas públicas más importantes, pero ello no se traduce en medidas concretas. La creación de un «Consejo de Política Científica, Tecnológica y de Innovación como órgano de cooperación y coordinación general de la investigación científica y técnica [...], adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación», puede ser pertinente y necesaria; sin embargo, su definición y atribuciones son confusas, y sus competencias se solapan en buena parte con las del actual Consejo Asesor de Ciencia, Tecnología e Innovación. Esta imprecisión en la responsabilidad de los distintos organismos en el diseño, seguimiento y evaluación de las políticas públicas es grave, no solo por la falta de concepto, sino porque es un impedimento para la inexcusable rendición de cuentas. Si a esto se añade la creación de un nuevo Sistema de Información sin suficientes recursos, humanos y tecnológicos, dependiente también del ministerio, pero con competencias indefinidas y en conflicto con otras entidades ya existentes, es muy improbable que el proyecto de ley consiga mejorar el funcionamien-

to del sistema. Es urgente reconocer y acordar que el fomento de la ciencia y la innovación no puede ser responsabilidad exclusiva de un único ministerio, sino que debe implicar a todos ellos. Así lo apuntábamos desde la COSCE en el informe de la Acción CRECE, publicado en 2005. Proponíamos que la ciencia fuera considerada política de Estado y que órganos como la antigua Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (la nueva ley prevé crear en su lugar el Consejo de Política Científica, Tecnológica y de Innovación) se adscribieran a la presidencia de Gobierno; y que se designara una vicepresidencia con responsabilidad en educación y ciencia, a la vez que se recuperara el ministerio de ciencia y universidades. La ciencia y la educación son los auténticos e irremplazables motores del avance de la sociedad y de su bienestar. Para ello es preciso que sus estrategias se diseñen de forma coordinada con la máxima independencia y autonomía y se aporten los recursos y herramientas necesarias para aplicarlas.

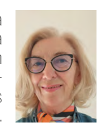
La financiación pública en España destinada a la investigación ha estado siempre muy por debajo de la media europea (en torno al 1,41 por ciento del PIB en 2020, en comparación con más del 3 por ciento en Alemania). Durante la crisis financiera, entre 2008 y 2016, España fue el segundo país de la OCDE que más redujo su presupuesto en investigación e innovación. La escasez de recursos y la inestabilidad de la financiación han tenido una repercusión negativa en el desarrollo de la actividad científica, y también ha desincentivado la contribución del sector privado en la ciencia. A ello se ha añadido la ausencia de estímulos adecuados para captar fondos privados y, lo que es más grave, la no ejecución de los fondos presupuestados: ¡en 2019 dejaron de ejecutarse el 74,2 por ciento de ellos!

En conclusión, consideramos que el anteproyecto de ley es, una vez más, una oportunidad perdida. Las tres carencias que se pretenden resolver coinciden con los tres ejes del Plan de Recuperación, Reconstrucción y Resiliencia, la estrategia del Gobierno español para canalizar los fondos europeos destinados a reparar los daños provocados por la crisis de la COVID-19. Ello hace pensar que el propósito de esta ley es cumplir los objetivos meramente formales de dicho plan, uno de los cuales es la reforma de la Ley de la Ciencia. Este planteamiento circunstancial, que soslaya afrontar los urgentes e imprescindibles cambios que necesita el sistema, no es la mejor estrategia para mejorar la posición de España en el contexto científico internacional.

La ciencia, la tecnología y la innovación son tres pilares indiscutibles del progreso económico y social. Este país necesita una ley que, más allá de la normativa, sea creíble y aborde los problemas reales, establezca un entorno institucional que permita la captación de talento científico y fomente una relación fructífera entre el sistema de ciencia y tecnología y la sociedad. De lo contrario, España se verá cada vez más relegada en el contexto científico internacional.

> El fomento de la ciencia y la innovación no puede ser responsabilidad exclusiva de un único ministerio

Aurelia Modrego Rico es miembro honorífico del Instituto de Economía de la Universidad Carlos III de Madrid, fue directora adjunta de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva y subdirectora general de Promoción General del Conocimiento. Ha coordinado varios proyectos de la Confederación de Sociedades Científicas de España para analizar las políticas científicas del Gobierno.



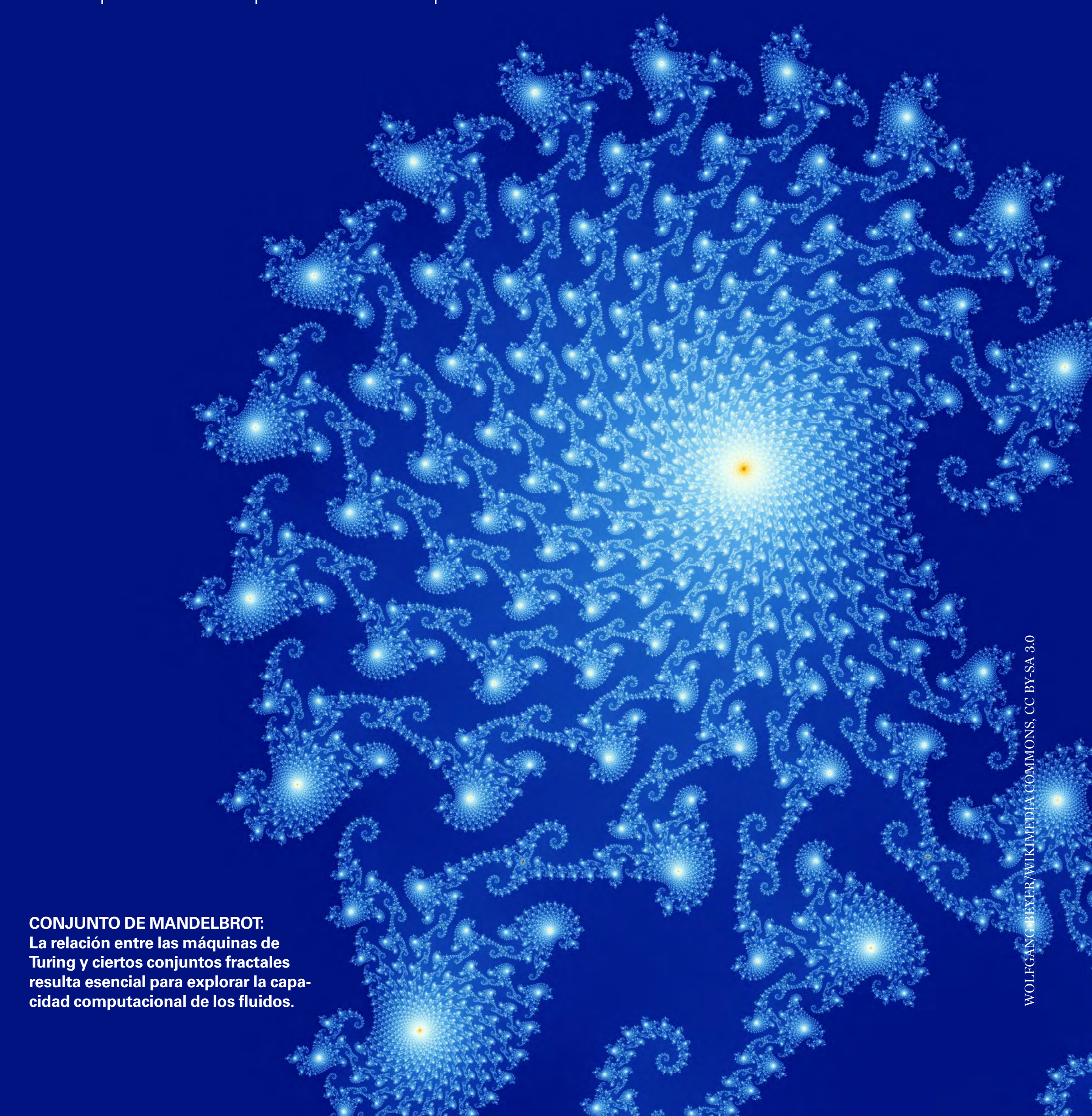
Clara Eugenia Núñez es catedrática de Historia e Instituciones Económicas de la UNED. Fue Directora General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid y fue responsable del diseño y puesta en marcha del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados.



FÍSICA MATEMÁTICA

HIDRODINÁMICA Y MÁQUINAS DE TURING

Robert Cardona, Eva Miranda y Daniel Peralta-Salas | ¿Es posible construir un superordenador a partir de un fluido puro?



CONJUNTO DE MANDELBROT: La relación entre las máquinas de Turing y ciertos conjuntos fractales resulta esencial para explorar la capacidad computacional de los fluidos.

No necesitamos otros mundos.
Necesitamos espejos.

Stanisław Lem,
Solaris (1961)

En síntesis

Una ingeniosa construcción matemática permite diseñar sistemas dinámicos capaces de simular cualquier algoritmo informático.

Eso lleva a la pregunta de si se puede construir un superordenador a partir de un fluido puro, que no esté mezclado con otros fluidos ni sometido a fuerzas externas.

Recientes avances han demostrado la viabilidad teórica de tales superordenadores para fluidos no viscosos y bajo ciertos supuestos poco realistas.

Dichos trabajos suponen un importante primer paso para evaluar la capacidad computacional de los fluidos reales.

En 1990, Cristopher Moore, un desconocido estudiante de doctorado de la Universidad Cornell, saltaba a la fama por un trabajo muy original que acababa de publicar en *Physical Review Letters*. En dicho artículo introducía una nueva forma de complejidad en dinámica, muy distinta de la por entonces popular teoría del caos. En sus argumentos, Moore utilizaba un tipo de conjuntos fractales muy sencillos, conocidos como conjuntos de Cantor. Mediante una ingeniosa construcción matemática basada en estos conjuntos y en transformaciones del plano, conseguía unificar por primera vez el mundo de la computación teórica, representado a través de las célebres máquinas de Turing, con la teoría de los sistemas dinámicos continuos.

Una de las consecuencias más espectaculares de la teoría de Moore fue la construcción de sistemas dinámicos capaces de simular cualquier algoritmo informático. En particular, la evolución de esos sistemas es «indecidible», en el sentido de que, para ciertos datos iniciales (e independientemente de la precisión con la que los conozcamos), no existe ningún algoritmo general que permita determinar si el sistema alcanzará ciertas regiones del espacio. Esta incapacidad de predicción es muy distinta de la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales que exhiben los sistemas caóticos (el famoso efecto mariposa formulado por Edward Lorenz).

Moore se preguntaba si esa capacidad computacional de algunos sistemas dinámicos sería extensible a los fluidos puros, una cuestión que aún permanece abierta y sobre la que presentaremos algunos avances recientes. Pero, antes, debemos abordar otras cuestiones: ¿cuál es la conexión entre computación e indecidibilidad? ¿Por qué se da la paradoja de que un sistema suficientemente potente desde el punto de vista computacional exhibe comportamientos que no es posible predecir de forma algorítmica? Para entenderlo, debemos remontarnos a los albores de la teoría de la computación.

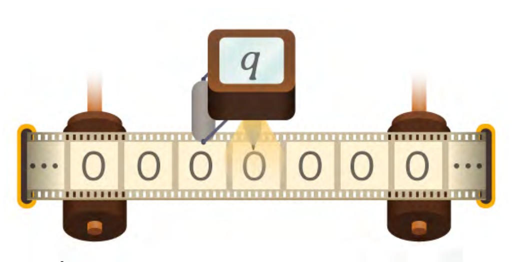
El problema de la parada

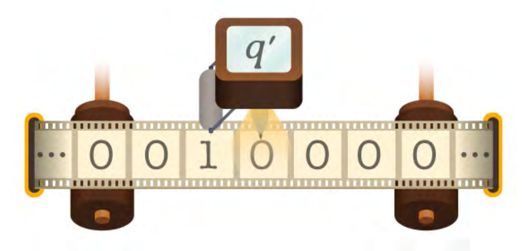
Alan Turing es, sin duda, uno de los grandes pensadores del siglo XX, y se le considera el «padre» de la informática moderna. Conocido popularmente por descifrar el código de la máquina Enigma durante la Segunda Guerra Mundial, en 1936 publicó un artículo revolucionario en el que sentó las bases de la teoría de la computación y probó que hay problemas que no se pueden resolver mediante un algoritmo general. Su trabajo se basó en lo que hoy denominamos máquinas de Turing.

El concepto de máquina de Turing es el precursor teórico de la computación moderna, es decir, un modelo abstracto de un ordenador. Esta noción le permitió a Turing demostrar de forma más accesible y sistemática los célebres teoremas de incompletitud que el gran matemático Kurt Gödel había probado unos pocos años antes, removiendo los cimientos de la lógica [*véase* «Así funciona el teorema de Gödel», por Natalie Wolchover; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2021]. En concreto, Turing usó un argumento de reducción al absurdo para demostrar que el denominado problema de la parada es indecidible: no puede existir ningún superordenador capaz de decidir si, al ejecutar un programa cualquiera, este llegará a un resultado y se detendrá o, por el contrario, seguirá funcionando en un bucle infinito.

En su revolucionario trabajo de 1936, Turing también precisó el significado de «superordenador» al introducir la noción de máquina universal de Turing, que sería una máquina de Turing capaz de simular cualquier otra.

Pero ¿qué es exactamente una máquina de Turing? Podemos visualizarla como una «impresora» de estados sobre una larga cinta con ceros y unos, que consideramos infinita. La





MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

LAS MÁQUINAS DE TURING pueden considerarse impresoras de estados que leen largas cintas con ceros y unos. En este ejemplo, la máquina cambia un 0 por un 1, modifica su estado de *q* a *q′* y desplaza la secuencia hacia la izquierda.

máquina parte de un estado q y de una cierta posición de la cinta y sigue unas determinadas instrucciones de funcionamiento: lee el símbolo que hay en esa posición de la cinta, lo modifica o no, cambia su estado a uno nuevo q' y se mueve un paso hacia la izquierda o la derecha, según un signo que viene codificado en la máquina. Esta continúa calculando hasta encontrar una instrucción que la lleve al estado de parada. Si eso no ocurre nunca, el algoritmo sigue ejecutándose indefinidamente.

Este concepto de máquina de Turing es el que usó Moore más de 50 años después para fusionar los sistemas dinámicos con la teoría de la computación.

Fenómenos indecidibles

En 1991, en una secuela de su primer trabajo en la que desarrolla con profusión su teoría, Moore aplica sus resultados a diversas sistuaciones físicas. En concreto, construye varios sistemas mecánicos (como partículas que se mueven en pozos de potencial) que pueden actuar como una máquina de Turing universal y simular cualquier algoritmo. Cuando un sistema tiene esta propiedad, decimos que es completo en el sentido de Turing o «Turing completo».

El concepto de simulación que usó Moore es muy ingenioso. Distintos datos de entrada de la máquina universal corresponden a diferentes condiciones iniciales de la partícula mecánica, mientras que la evolución de la máquina representa las trayectorias de la partícula en el espacio. Si, tras un cierto número de pasos, la máquina de Turing se detiene y genera un resultado, eso se traduce en que la trayectoria de la partícula correspondiente alcanza una determinada región del espacio, conocida como «región de parada». En cambio, si la máquina no deja nunca de hacer cálculos (entra en bucle), la órbita de la partícula nunca alcanzará esa región.

A partir de esa equivalencia entre pasos de la máquina de Turing y trayectorias de partículas, Moore logró demostrar la existencia de trayectorias indecidibles, como consecuencia de la indecidibilidad del problema de la parada que había establecido Turing. El significado de este resultado es enigmático: para algunos sistemas mecánicos, no es posible decidir si las partículas alcanzarán ciertas regiones del espacio, sin importar la potencia del algoritmo que usemos. En otras palabras, el problema no es computable.

En vista de su descubrimiento, Moore plantea la cuestión de si hay otros sistemas físicos capaces de convertirse en superordenadores (es decir, de simular una máquina universal de Turing). En concreto, Moore se pregunta si la mecánica de fluidos es Turing completa: ¿existen superordenadores hechos de fluido puro, sin mezclas con otros fluidos ni fuerzas externas? Hallazgos posteriores al de Moore han permitido establecer la completitud de Turing para numerosos sistemas físicos relativos a diversas áreas, como la óptica o la mecánica cuántica. Sin embargo, su pregunta sobre la dinámica de fluidos ha permanecido treinta años sin respuesta.

Máquinas de agua: ¿realidad o ficción?

Así pues, ¿podemos construir máquinas de fluido puro? En particular, ¿puede el agua computar? Y, llevado a extremos aún más inverosímiles, ¿puede el agua pensar? La novela *Solaris*, publicada por Stanisław Lem en 1961, presenta un mar pensante, un gigantesco océano protoplasmático que representa la inteligencia alienígena. En la obra leemos, por ejemplo, el siguiente párrafo:

> [...] *el océano pensante que cubría todo Solaris era un cerebro gigante que superaba a nuestra civilización en millones de años de desarrollo, una especie de «yogui cósmico», un sabio, la omnisciencia personalizada que hacía mucho que había asumido la vanidad de cualquier acción y que, por ese motivo, mantenía ante nosotros un silencio categórico.*

¿Podemos construir máquinas de fluido puro? En particular, ¿puede el agua computar?

La novela de Lem ha sido llevada al cine en tres ocasiones: por el director soviético Boris Nirenburg (1968), por Andréi Tarkovski (1972) y por Steven Soderbergh (2002), en la que seguramente sea la versión más popular. Desde un punto de vista artístico, la cuestión que planteó Moore en 1991 puede interpretarse como una pregunta sobre la existencia del océano de Solaris. En las novelas y las películas, el protagonista es un psicólogo. En la investigación que presentamos en este artículo, los protagonistas somos matemáticos y físicos, y nos apoyamos en construcciones propias de las ciencias de la computación, la geometría y el análisis matemático.

Un problema de un millón de dólares

Del mismo modo que las máquinas de Turing representan el fundamento riguroso de la teoría de la computación, las ecuaciones de Navier-Stokes, introducidas en 1845 por Claude Navier y George Stokes, son los objetos matemáticos que describen la evolución de los fluidos (líquidos y gases) viscosos, es decir, aquellos que presentan rozamiento interno. A pesar de su inestimable importancia en física e ingeniería, esas ecuaciones aún siguen encerrando muchas incógnitas hoy en día, más de 150 años después de su formulación. Y una de ellas reviste especial relevancia para nuestro problema. Veamos en qué consiste.

En el año 2000, el prestigioso Instituto Clay de Matemáticas publicó una lista con los siete problemas matemáticos que podríamos considerar más importantes para las generaciones futuras. La resolución de uno de estos «problemas del milenio» conlleva no solo la gloria científica, sino también un premio de un millón de dólares. En 2003, el matemático ruso Grigori Perelman fue noticia por haber resuelto uno de los problemas de la lista, la conjetura de Poincaré, planteada por el polímata francés Henri Poincaré en 1904. Perelman saltó a la fama por negarse a recoger el sustancioso premio, y también declinó la medalla Fields, considerada el Nobel de las matemáticas. Diecinueve años después del hito de Perelman, aún no se ha resuelto ningún otro problema del milenio.

Uno de esos siete rompecabezas se refiere justamente a las ecuaciones de Navier-Stokes. El problema consiste en determinar si todas las condiciones iniciales (todas las configuraciones de partida del fluido) dan lugar a soluciones suaves que evolucionan de forma indefinida o, por el contrario, existen ciertas circunstancias en las que las soluciones degeneran hasta «explotar» tras cierto tiempo. Esta explosión alude a la aparición de singularidades, regiones del espacio donde la energía del fluido se concentra hasta hacerse infinita. En tres dimensiones (la situación correspondiente al espacio físico que nos rodea), la cuestión permanece completamente abierta. No sucede lo mismo con las ecuaciones de Navier-Stokes en dos dimensiones: como probó la matemática soviética Olga Ladýzhenskaya en 1950, en ese caso ninguna configuración inicial del fluido genera singularidades con el tiempo. Ladýzhenskaya también hizo importantes contribuciones para entender las soluciones tridimensionales de estas ecuaciones, pero no consiguió descifrar el enigma.

El problema de Navier-Stokes fue planteado por Charles Fefferman, matemático de la Universidad de Princeton recientemente galardonado con el Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento. Tanto hallar una configuración inicial que explote al evolucionar como probar lo contrario, que nunca hay explosiones, zanjaría la cuestión. Y su interés no es meramente académico. En particular, la existencia de soluciones abruptas (que desarrollen singularidades) supondría una auténtica revolución en todas las áreas donde se aplican las ecuaciones de Navier-Stokes: de la oceanografía a la meteorología, los volcanes y el estudio de tsunamis. Y también ampliaría nuestra comprensión del complejo fenómeno de la turbulencia.

El matemático Terence Tao demostró en 2016 la existencia de tales comportamientos abruptos en las soluciones de un modelo simplificado que retiene las propiedades físicas fundamentales de las ecuaciones de Navier-Stokes. En las soluciones que encontró Tao, después de un tiempo finito, toda la energía se acumula en un punto y la solución explota. Su argumento recuerda a un

proceso algorítmico, donde construye puertas lógicas que van guiando la solución hasta hacerla explotar. Por este motivo, Tao se hace una pregunta muy similar a la planteada por Moore unos años antes: si podrían existir soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes (o de las ecuaciones de Euler, su versión para fluidos no viscosos) que consigan imitar los algoritmos de una computadora. Tao especula que esta idea podría servir de base para diseñar soluciones que exploten tras cierto lapso de tiempo. Aunque este planteamiento de Tao no ha tenido éxito hasta la fecha, constituye una motivación adicional para tratar de entender la capacidad computacional de los fluidos.

Hidrodinámica y computación

En los últimos tres años se han realizado avances notables con respecto a las conexiones entre las ecuaciones de la hidrodinámica y la teoría de la computación. En particular, se ha demostrado que existen soluciones de las ecuaciones de Euler capaces de simular cualquier algoritmo informático, es decir, que son Turing completas.

En un trabajo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* en 2021, los autores de este artículo y Francisco Presas, del Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, construimos soluciones Turing completas de fluidos en equilibrio en ciertos dominios geométricos curvos, combinando la teoría desarrollada por Moore con nuevas herramientas. Estas soluciones tienen la ventaja de estar localizadas en un espacio acotado (es decir, finito), pero su geometría no se corresponde con la de nuestro mundo, la geometría euclídea. En otro artículo más reciente, empleamos métodos totalmente distintos para demostrar que también hay soluciones de fluidos en equilibrio que se comportan como un ordenador universal en el espacio euclídeo, pero a expensas de trabajar en un espacio no acotado. En particular, estas soluciones no tienen energía finita, como si, de alguna forma, la infinita potencia computacional del fluido viniera a costa de tener una energía ilimitada.

Esos dos trabajos se refieren a soluciones en equilibrio, es decir, para las que la corriente del fluido no varía con el tiempo. En un tercer estudio construimos también soluciones Turing completas de las ecuaciones de Euler fuera del equilibrio. No obstante, la dificultad que conlleva lidiar con soluciones dependientes del tiempo obliga a trabajar en espacios curvos de dimensión gigantesca, superior al número de granos de arena contenidos en todas las playas de la Tierra.

La noción de completitud de Turing es ligeramente distinta para las situaciones en equilibrio y fuera del equilibrio: con los fluidos estacionarios, la simulación de la máquina universal de Turing se lleva a cabo en el espacio físico mediante las trayectorias de las partículas del fluido, algo que se conoce como descripción lagrangiana. Por el contrario, en el caso dependiente del tiempo, los algoritmos se ejecutan mediante la evolución del campo de velocidades del fluido (la «corriente») en el espacio de infinitas dimensiones de todos los campos, lo que recibe el nombre de descripción euleriana.

Como ya hemos mencionado, una de las consecuencias más llamativas de estos resultados es la existencia de trayectorias del fluido que son indecidibles, es decir, para las que no existe ningún algoritmo que permita decidir si la partícula fluida alcanzará una determinada región del espacio. Así, el problema de la parada resuelto por Turing en 1936 se plasma en la evolución de los líquidos y gases que nos rodean.

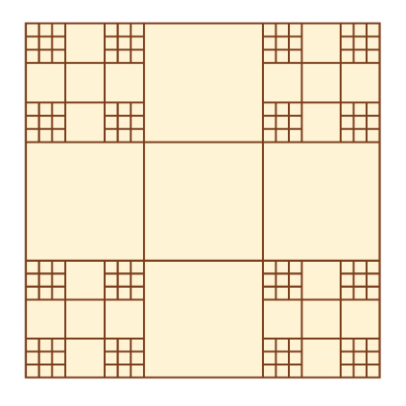
Los «ordenadores de agua» teóricos presentados en estos trabajos están hechos de fluido puro, sin interfases: no hay distintos componentes ni fuerzas externas. En un sentido metafórico, estos modelos están más cerca del océano omnisciente imaginado por Lem en *Solaris* que de las construcciones habituales en el área de la ingeniería conocida como fluídica, donde se emplean válvulas, conductos y mezclas de diversos líquidos.

A continuación, recorreremos el improbable camino que ha llevado a estos descubrimientos, fruto de una suerte de serendipia. Como en tantas otras ocasiones, la confluencia de áreas aparentemente desconectadas conduce a la resolución de un enigma, y el avance de la ciencia llega gracias al trabajo sostenido en el tiempo de varias generaciones de investigadores.

Una inesperada conexión geométrica

En 1994, el matemático estadounidense Dennis Sullivan, que destaca por su originalidad y profundidad de pensamiento y acaba de recibir el prestigioso premio Abel, planteó una idea novedosa en un ciclo de conferencias celebrado en la Universidad de la Ciudad de Nueva York: conectar ciertas soluciones de las ecuaciones hidrodinámicas, los llamados campos de Beltrami, con un área de las matemáticas conocida como geo-





EL CONJUNTO DE CANTOR, representado en un intervalo de la recta (*izquierda*), puede construirse de manera iterativa, dividiendo cada intervalo en tres y eliminando la parte central. Si consideramos el producto de dos intervalos de Cantor, obtenemos el conjunto cuadrado de Cantor (*derecha*), que se construye dividiendo de manera fractal los cuadrados de las esquinas.

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

metría de contacto. Esta idea fue ampliamente desarrollada a partir de 1997 por John Etnyre y Robert Ghrist, a la sazón investigadores posdoctorales en la Universidad de Texas en Austin, en una serie de trabajos. Gracias a esa conexión, es posible emplear potentes teorías de geometría y topología diferencial para construir soluciones de las ecuaciones de Euler en equilibrio en dominios geométricos curvos.

Los campos de Beltrami fueron introducidos por el matemático italiano Eugenio Beltrami en 1889. Su impulso vino sobre todo de manos del matemático soviético Vladímir Arnold, quien estudió la estructura de los fluidos en equilibrio y conjeturó, en un influyente artículo de 1965, que la complejidad de los campos de Beltrami es análoga a la de la mecánica celeste. Esta conjetura fue analizada numéricamente por Michel Hénon en 1966 utilizando los campos ABC, una familia de campos de Beltrami que se pueden escribir de manera explícita por medio de funciones trigonométricas.

Los hallazgos de Sullivan, Etnyre y Ghrist ponen de manifiesto la equivalencia entre los campos de Beltrami y los llamados campos de Reeb. Estos últimos aparecen de forma natural en los problemas de mecánica celeste y llevan asociada una nueva geometría, denominada «de contacto». Como curiosidad, digamos que esta geometría permite justificar de forma teórica cómo hasta el conductor menos hábil puede aparcar un coche de longitud L en un espacio ligeramente mayor que L con muy pocas maniobras.

Gracias a esa correspondencia entre los campos de Beltrami y de Reeb, podemos crear un «espejo» entre la dinámica de fluidos y los objetos geométricos. Así, hay muchas construcciones geométricas abstractas que nos cuentan lo que sucede al otro lado del espejo, en la mecánica de fluidos. La existencia del espejo pone al mismo nivel la (tal vez engañosa) simplicidad de la geometría y el carácter aparentemente más complejo de la hidrodinámica, dado por los campos de Beltrami. Dos mundos en principio distintos resultan estar más cerca de lo que se creía.

Y eso permite reducir la construcción de soluciones para un fluido en equilibrio a la construcción de campos de Reeb. Esta última es mucho más flexible y en ella desempeñan un papel esencial la teoría de los sistemas dinámicos y, en concreto, los hallazgos de Moore de 1990 y 1991.

La teoría de Moore y los fractales

Los fractales representan una parte de las matemáticas muy conectada con el arte, y es que los patrones que se replican y repiten en un conjunto fractal engendran imágenes impactantes que se han abierto camino hasta los museos. Katherine Hyles analizó la geometría fractal desarrollada por el matemático Benoît Mandelbrot y la describió como una «nueva estética», acuñando así el término de arte fractal.

Seguramente el más simple y ubicuo de los fractales es el conjunto de Cantor, que se puede dibujar en una dimensión. Podemos definirlo de manera iterativa en un intervalo de la recta: para ello, dividimos el intervalo en tres partes y eliminamos la parte central; a continuación, hacemos lo propio con cada uno de los dos nuevos intervalos resultantes, y así sucesivamente.

Pero ¿qué tienen que ver los fractales con las máquinas de Turing? Resulta que ambos están conectados a través del conjunto de Cantor. Por su construcción, dicho conjunto está íntimamente relacionado con el desarrollo de un número en base 3. Moore, en su teoría de 1991, usa ese desarrollo para codificar las configuraciones de una máquina de Turing en el conjunto cuadrado de Cantor, el conjunto fractal que se obtiene al considerar el producto de dos

intervalos de Cantor. Así, cada configuración de la máquina de Turing se corresponde con un único punto del conjunto cuadrado de Cantor, y la evolución de la máquina puede visualizarse como un movimiento entre puntos de dicho conjunto.

El resultado principal de la teoría de Moore es que existe una transformación por bloques que envía el conjunto cuadrado de Cantor sobre sí mismo y tal que todo punto asociado a una configuración de la máquina de Turing es enviado al punto asociado a la siguiente configuración, de acuerdo con el algoritmo [*véase la figura de la página siguiente*]. Los detalles de esta transformación por bloques dependen de la descripción de la máquina, pero siempre podemos pensar que consiste en mover un número finito de bloques. En resumen, Moore muestra que la evolución de todo algoritmo puede entenderse como un sistema dinámico definido sobre el conjunto de Cantor.

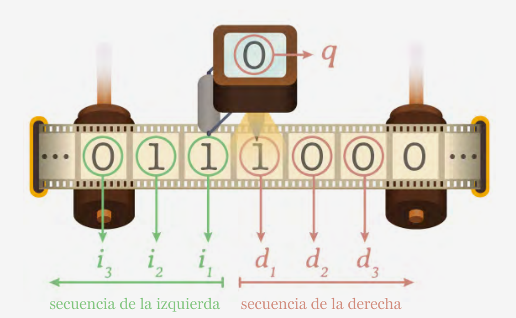
Estas ideas introducidas por Moore son clave para la demostración en la que se basa nuestro primer trabajo. Partiendo de ellas, logramos construir una transformación en un disco (rellenando los huecos que deja la transformación en bloques de Moore, para evitar discontinuidades) que es capaz de imitar una máquina universal de Turing.

El paso final consiste en «encajar» de algún modo esta transformación del disco en la evolución de un campo de Reeb. Para encajar punto a punto una dinámica discreta en un flujo continuo, empleamos una técnica muy general denominada suspensión, concebida por Poincaré en sus estudios de mecánica celeste. La idea consiste en construir un flujo en un anillo sólido, de manera que, si observamos la evolución de una partícula fotograma a fotograma, cada vez que esa partícula pasa por un disco fijo (una sección transversal), lo hace siguiendo la transformación por bloques.

Usando complejas técnicas de geometría de contacto, podemos garantizar que ese flujo está generado por un campo de Reeb. Y entonces nuestro «espejo» nos permite construir una solución en equilibrio de las ecuaciones de Euler (un campo de Beltrami) que simula una máquina de Turing universal. El espacio donde se construye esa máquina de agua es curvo, debido a que se utiliza la conexión geométrica desarrollada por Etnyre y Ghrist. De alguna manera, el precio a pagar por usar la «magia» de la geometría de contacto es que debemos curvar el espacio donde se desplaza el fluido.

Máquinas de Turing y fractales

Un resultado esencial de cara a explorar la capacidad computacional de los fluidos es que cada configuración de una máquina de Turing se puede asociar con un único punto del conjunto cuadrado de Cantor. Para ilustrarlo, consideremos la siguiente máquina:



Como ya hemos mencionado, la configuración de la máquina en un paso dado del algoritmo viene dada por su estado q y la cinta infinita de ceros y unos. (En este caso, suponemos que todos los números de la cinta son 0 salvo los que se ven en la imagen.) Podemos pensar que la cinta está formada por dos secuencias de ceros y unos, una situada a la izquierda de la máquina (i) y otra a la derecha de ella (d):

$$i = (i_1, i_2, i_3, \dots) = (1, 1, 0, \dots),$$

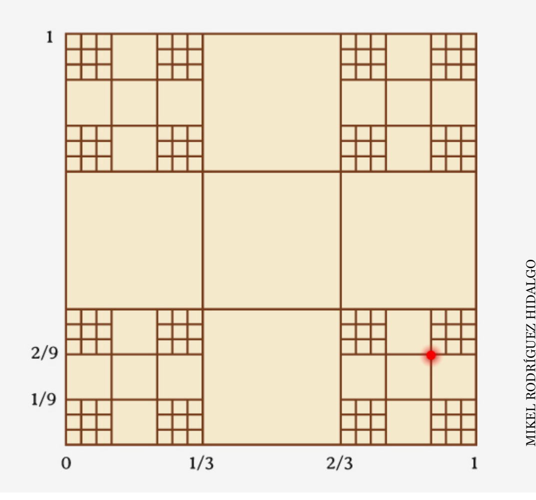
$$d = (d_1, d_2, d_3, \dots) = (1, 0, 0, \dots).$$

Ahora ya podemos identificar cualquier configuración de la máquina con un punto en el conjunto cuadrado de Cantor: la secuencia de la izquierda nos da la coordinada horizontal de ese punto (en concreto, su expansión en base 3), y la secuencia de la derecha, junto con el estado q, nos da la coordinada vertical:

$$x = i_1 \cdot \frac{2}{3} + i_2 \cdot \frac{2}{3^2} + i_3 \cdot \frac{2}{3^3} + \cdots = \frac{2}{3} + \frac{2}{9},$$

$$y = q \cdot \frac{2}{3} + d_1 \cdot \frac{2}{3^2} + d_2 \cdot \frac{2}{3^3} + \cdots = \frac{2}{9}.$$

Esas coordenadas corresponden al siguiente punto del conjunto cuadrado de Cantor (*rojo*):



MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

El desafío euclídeo

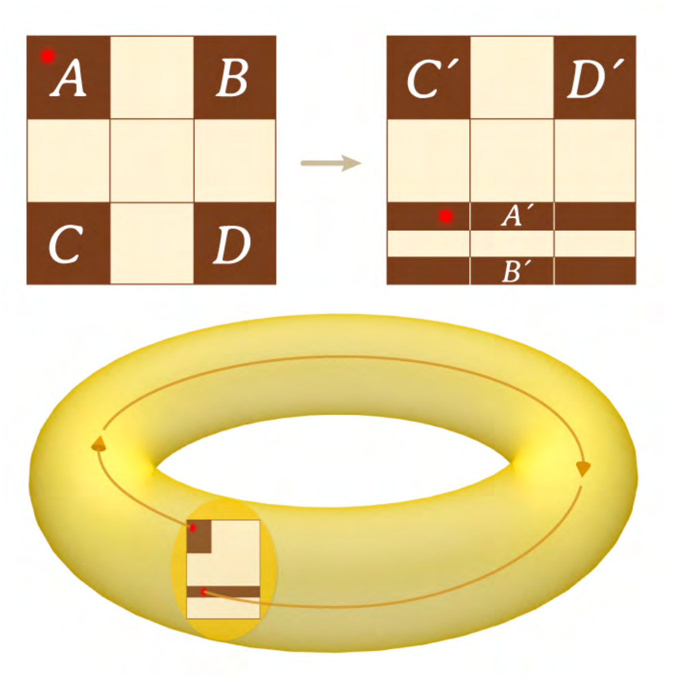
Poco a poco, nos vamos acercando a la conclusión de esta aventura científica. La construcción que acabamos de ver nos permite simular una máquina de Turing universal (es decir, cualquier algoritmo informático) mediante el flujo de un fluido en equilibrio sobre un espacio curvo. Un punto clave de la demostración es que la métrica del espacio es una variable más, de tal forma que sufre deformaciones en un entorno del anillo sólido donde el fluido simula la máquina. Aunque este tipo de modificaciones de la curvatura del espacio son habituales en la física teórica (por ejemplo, en la descripción del espaciotiempo en las proximidades de un agujero negro), hacen que las ecuaciones de Euler no correspondan al movimiento físico estándar.

La pregunta evidente es si podemos construir esa «máquina de agua» en el espacio físico del mundo real. Nosotros hemos resuelto esta cuestión construyendo un campo de Beltrami y, por ende, una solución del fluido en equilibrio, en el espacio euclídeo. Puesto que la correspondencia geométrica que hemos explicado antes no permite construir soluciones en espacios sin curvatura, la demostración requiere un cambio radical de estrategia: a nuevos retos, nuevas técnicas. Y, en este caso, una de las herramientas necesarias resulta ser una teoría desarrollada por Augustin Louis Cauchy y Sofía Kovalévskaya en el siglo XIX.

El estudio de las ecuaciones en derivadas parciales, como las de Euler o Navier-Stokes que describen los fluidos, es tan complejo que cada ecuación suele precisar de ideas y técnicas totalmente distintas. En ese sentido, el resultado conocido como teorema de Cauchy-Kovalévskaya es bastante atípico en el mundo de las ecuaciones diferenciales. Se trata de una herramienta que permite construir soluciones de ecuaciones analíticas, es decir, ecuaciones cuyos coeficientes son funciones que pueden aproximarse bien mediante polinomios. Pero, a pesar de esta restricción, el teorema es muy general, dado que es aplicable tanto a la ecuación del potencial gravitatorio, como a la que describe el flujo de calor o a la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica.

Cauchy demostró la primera versión del teorema en 1842, mientras que Kovalévskaya lo generalizó y lo puso en un contexto más amplio en 1875. Una de sus principales limitaciones es que, en general, solo permite obtener soluciones de las ecuaciones diferenciales en pequeñas regiones del espacio. Así, si queremos construir soluciones definidas en todo el espacio euclídeo, es necesario analizar los pormenores de la demostración del teorema para ver si las soluciones que nos proporciona se pueden extender globalmente.

Nosotros empleamos una versión del teorema de Cauchy-Kovalévskaya, que genera campos de Beltrami globales a partir de campos en un plano con cierta estructura. El complejo problema tridimensional original se reduce así a una cuestión de sistemas mecánicos bidimensionales. Entonces podemos aprovechar toda la potencia de las herramientas de los sistemas dinámicos y de la teoría de la computación para diseñar esos campos bidimensionales, conocidos como «datos de Cauchy», que engendrarán un fluido en equilibrio en el espacio físico. El principal inconveniente de este flujo es que su energía y su masa, que se extienden por todo el espacio, son infinitas; este



HAY UNA TRANSFORMACIÓN POR BLOQUES del conjunto cuadrado de Cantor sobre sí mismo que envía todo punto asociado a una configuración de la máquina de Turing al punto asociado a la siguiente configuración. En este ejemplo construido por Cristopher Moore (*arriba*), la transformación envía el punto rojo de la izquierda al de la derecha, y cada bloque etiquetado con una letra al que lleva la misma letra con una prima. A partir de esa idea, es posible construir un flujo en un anillo sólido (*abajo*) de modo que, cada vez que una partícula pasa por un disco fijo, lo hace siguiendo la transformación por bloques.

es, de algún modo, el precio que hay que pagar por construir un fluido físico con la capacidad de simular todos los algoritmos posibles.

Desde un punto de vista práctico, si lo que uno pretende no es simular cualquier máquina de Turing, sino solo aquellas capaces de computar un número prefijado k de pasos y bits de memoria, se pueden emplear variaciones de la construcción anterior que permiten diseñar fluidos con energía finita. Pero nada sale gratis: eso nos obliga a introducir en el sistema una energía enorme, del orden de una triple exponencial $\exp(\exp(\exp(k)))$, de tal forma que simular unos pocos bits de memoria requeriría toda la energía del universo visible. Si bien la teoría que hemos presentado, al ser la primera, seguramente está muy lejos de ser óptima, basta para apoyar la tesis de acotación espacial de Church-Turing, formulada por Mark Braverman, Jonathan Schneider y Cristóbal Rojas: la memoria del sistema impone una limitación insalvable sobre su poder computacional.

Final de trayecto

Llegados al final de esta historia, es momento de volver sobre nuestros pasos hacia el punto de partida. Los avances recientes que hemos discutido responden afirmativamente, con las limitaciones ya mencionadas, a la pregunta de Moore sobre la capacidad computacional de la hidrodinámica. La conclusión es que, si curvamos el espacio o transferimos una energía ilimitada al sistema, existen fluidos teóricos en equilibrio —e incluso fuera del equilibrio, si aumentamos drásticamente el número de dimensiones— que pueden imitar una máquina de Turing universal.

No obstante, la teoría que ha permitido establecer esas conclusiones funciona solo cuando el fluido no tiene viscosidad y obedece las ecuaciones de Euler. Esta premisa es poco realista desde el punto de vista físico, puesto que nada escapa al rozamiento, salvo en condiciones extremas cercanas al cero absoluto de temperatura. Sin embargo, es difícil superar esta limitación con las herramientas desarrolladas hasta la fecha. En concreto, la teoría de la computación hace una advertencia al respecto: un teorema de Olivier Bournez, Daniel Graça y Emmanuel Hainry muestra que es imposible construir sistemas Turing completos con energía finita y que sean robustos frente a perturbaciones. En otras palabras, añadir viscosidad al sistema, por muy pequeña sea, puede destruir su potencia computacional. Las futuras investigaciones habrán de determinar si las ecuaciones de Navier-Stokes poseen la misma capacidad computacional que las de Euler.

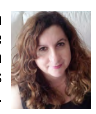
El sueño de Tao de usar ordenadores universales de fluido para construir soluciones explosivas de las ecuaciones de Euler o Navier-Stokes tendrá que seguir esperando. La viscosidad no es la única limitación, puesto que en el caso de las ecuaciones de Euler ya se han obtenido soluciones Turing completas. Una vez más, el problema es la energía: las soluciones que busca Tao requieren un número sustancial de simetrías (en el espacio euclídeo, sin curvatura) y deben partir de una configuración inicial con energía finita. Solo entonces nuestro ordenador fluido podría, mediante algún mecanismo aún por descifrar, guiar la solución hacia una singularidad, una explosión de sus propiedades.

Lejos aún de poder afirmar la existencia de soluciones Turing completas de este tipo, las investigaciones seguirán progresando, se meterán en callejones sin salida o se verán beneficiadas por la serendipia de otros descubrimientos. Sin duda avanzarán con paso lento, pero firme, porque la ciencia, como toda actividad que se lleve a cabo con rigor y profundidad, precisa el paso del tiempo.

Robert Cardona es investigador posdoctoral en la Universidad de Estrasburgo. Su trabajo se centra en las áreas de la geometría, la topología y los sistemas dinámicos.



Eva Miranda es catedrática de geometría y topología en la Universidad Politécnica de Cataluña, adscrita al Centro de Investigación Matemática (CRM). Es investigadora del programa ICREA Academia y su trabajo se centra en la geometría, sus interacciones con los sistemas dinámicos y la física matemática.



Daniel Peralta-Salas es científico titular en el Instituto de Ciencias Matemáticas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, donde estudia diversos fenómenos geométricos y dinámicos que surgen en las ecuaciones diferenciales de la física.



PARA SABER MÁS

Constructing Turing complete Euler flows in dimension 3. Robert Cardona, Eva Miranda, Daniel Peralta-Salas y Francisco Presas en *Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 118*, art. e2026818118, mayo de 2021.

Looking at Euler flows through a contact mirror: Universality and undecidability. Robert Cardona, Eva Miranda y Daniel Peralta-Salas en arXiv:2107.09471, julio de 2021.

Turing universality of the incompressible Euler equations and a conjecture of Moore. Robert Cardona, Eva Miranda y Daniel Peralta-Salas en *International Mathematics Research Notices*, art. rnab233, agosto de 2021.

Computability and Beltrami fields in Euclidean space. Robert Cardona, Eva Miranda y Daniel Peralta-Salas en arXiv:2111.03559, noviembre de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Máquinas de Turing. John E. Hopcroft en *IyC*, julio de 1984.

La ciencia después de Alan Turing. VV. AA. Colección TEMAS, n.º 68, 2012.

Lo que Church y Turing ya sabían sobre mi portátil. Salvador Lucas en *IyC*, agosto de 2016.

PRIMATOLOGÍA

LOS SECRETOS DE LOS PAPIONES SAGRADOS

Nathaniel J. Dominy | El estudio de papiones vivos y momificados desvela por qué los egipcios veneraban a este fastidioso primate y señala la probable ubicación de un reino legendario



Momia de un papión, encontrada en la tumba KV 51 del valle de los Reyes, cerca de Luxor. Según se cree, fue una de las mascotas favoritas de la familia real.

RICHARD BARNES

Entre los fondos del Museo Británico de Londres reposa, en eterna sedestación, una momia catalogada con el código EA6736. Hallada en el templo de Jonsu, en Luxor, se remonta a la época del Imperio Nuevo, entre los años 1550 y 1069 a.C. Una inspección más cercana desvela pistas sobre su identidad. Por entre las vendas de lino, deshechas en algunos puntos, sobresale un pelaje tupido, mientras que en los pies asoman unas uñas imponentes. Las radiografías revelan el esqueleto característico y el hocico alargado de un primate. El animal momificado es un papión sagrado o hamadríade (*Papio hamadryas*).

La momia EA6736 es uno de los muchos papiones presentes en el arte y la religión del antiguo Egipto. Plasmados en infinidad de pinturas, relieves, estatuas y joyas, aparecen una y otra vez a lo largo de 3000 años de historia. La estatua de uno, fechada entre 3150 y 3100 a.C., lleva grabado el nombre del rey Narmer; siglos más tarde, Tutankamón, que gobernó entre los años 1332 y 1323 a.C., lucía un collar decorado con papiones adorando al sol, y en el muro occidental de su tumba hay pintada una docena de ellos, que se cree representan las horas de la noche.

Los egipcios veneraban al papión sagrado como encarnación de Tot, dios de la luna y de la sabiduría y consejero de Ra, dios del sol. No era el único animal elevado a la categoría divina: el chacal se asociaba con Anubis, dios de la muerte; el halcón, con Horus, dios del firmamento; y el hipopótamo con Tueris, diosa de la fertilidad. Ahora bien, el papión es una elección harto curiosa: por un lado, quienes conviven con él lo consideran un vecino indeseable y más que molesto; por otro, es el único animal del panteón egipcio que no es originario del país.

La preeminencia del papión en la cultura del antiguo Egipto intriga a los arqueólogos desde hace tiempo. En los últimos años, los descubrimientos hechos por mi grupo de investigación arrojan algo de luz sobre este misterio. Nuestro trabajo indica que la divinización de la especie tendría una explicación biológica y, además, demuestra cómo obtenían los egipcios tan exóticos animales. Curiosamente, las investigaciones sobre el origen de los papiones sagrados iluminan otro viejo enigma: la probable ubicación del legendario reino de Punt.

En síntesis

Las momias y las imágenes conservadas dejan constancia de que el papión hamadríade era venerado en el antiguo Egipto.

El motivo sería el comportamiento que muestra este primate al amanecer, con el que parece saludar al astro rey.

En realidad, con esa exposición al sol capta calor para activar la microbiota intestinal, que facilita la digestión de los vegetales ingeridos.

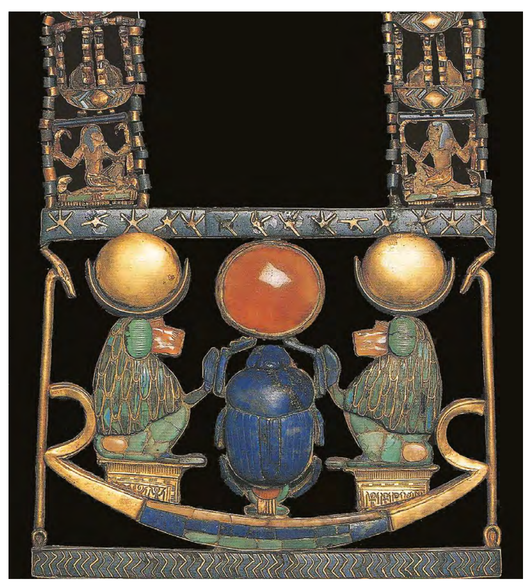
El estudio de las momias de papión también ha permitido señalar en el mapa la probable ubicación del antiguo reino de Punt, región de procedencia de este animal.

Menudo dios

«¡Papiones!» es una exclamación que nadie quiere oír en una fiesta al aire libre. Cuando vivíamos en Kenia, una veintena irrumpió en nuestro jardín mientras celebrábamos el sexto cumpleaños de mi hijo, provocando gritos y la desbandada general de los niños. Los intrusos se abalanzaron sobre la mesa, primorosamente dispuesta con zumos, pastelitos y fruta cortada. Ese día se dieron un verdadero festín: en pocos minutos se atiborraron con el resultado de varias horas de labor humana. Aparte del desconsuelo de mi hijo, lo peor fue ver a los dos machos bostezando en dirección a mí; como primatólogo, sé que el bostezo es una señal social, una forma de lucir los afilados caninos, capaces de desgarrar de una dentellada el brazo o la pierna de una persona. Pero dada la situación, aquel gesto no parecía representar una amenaza, sino la expresión beatífica del sopor que provoca una comilona.

Cuando relaté lo ocurrido a mis colegas kenianos, me contestaron con gestos de asentimiento y un refrán: «De los papiones que se meten en un sembrado, no todos saldrán saciados». Como muchos dichos africanos, este tiene varias capas de significado. Alude a su voracidad y a las incursiones en los campos de cultivo, al tiempo que evoca sus aviesos propósitos. Catherine M. Hill, profesora de antropología en la Universidad Oxford Brookes, ha constatado que los papiones causan verdaderos estragos a muchas familias del oeste de Uganda, pues reducen a la mitad el rendimiento de las cosechas. De hecho, son la plaga más temida por muchos pequeños agricultores en África, donde la aversión cultural hacia ellos está muy arraigada. Si ignorar a alguien es la





MUSEO BRITÁNICO (*momia*); NATHANIEL J. DOMINY (*collar*)

Papión momificado EA6736 (*izquierda*), hallado en el templo de Jonsu, en Luxor, y collar perteneciente a Tutankamón (*derecha*). Estos son algunos de los numerosos papiones sagrados que aparecen en el arte y la religión del antiguo Egipto.

mayor forma de desprecio, resulta lógico que el papión apenas aparezca en la artesanía tradicional del África subsahariana. Justo por eso resulta tan desconcertante la adoración que se le profesaba en Egipto y su omnipresencia en las manifestaciones artísticas de esa civilización.

También llamados babuinos, los papiones se dividen en seis especies. Todas ellas son oriundas del África subsahariana y del sudoeste de la península arábiga, donde la mayoría de habitantes las consideran alimañas. Por los restos arqueológicos, sabemos que los antiguos egipcios importaban tanto *P. hamadryas* como *P. anubis*, cuyo nombre vulgar es papión oliva. Sin embargo, solo divinizaron al primero, así que, a la hora de explicar por qué le rendían culto, hay que tener en cuenta esa preferencia por una especie y no por la otra.

En sus intentos por esclarecer la relevancia del papión sagrado, los investigadores han estudiado sus representaciones en el arte egipcio, donde destacan dos formas icónicas. Una es la del macho, sentado sobre las callosidades de las nalgas, con las manos apoyadas sobre las rodillas, la cola replegada hacia la derecha y un disco lunar sobre la cabeza. En la segunda, conocida como gesto de adoración, el macho levanta las manos con las palmas hacia arriba, orientadas hacia el dios solar Ra. En efecto, son muchos los textos egipcios que relacionan a este primate con Ra; por ejemplo, en los famosos *Textos de las pirámides*, de contenido funerario, se le describe como hijo primogénito o predilecto de Ra. Y el *Libro de los muertos* ofrece la siguiente fórmula para que el difunto la pronuncie en el momento de resucitar: «He elevado mi canto y mi alabanza al disco solar. He ido adonde los papiones, y ahora soy uno de ellos».

Como explicación del vínculo entre el papión y Ra, la egiptóloga Elizabeth Thomas sugirió en 1979 que los egipcios habrían visto un gesto de reverencia en la actitud que el animal muestra al amanecer, cuando se coloca frente al sol para captar su calor. Esta idea cobró fuerza un decenio más tarde, cuando otro egiptólogo, el difunto Herman te Velde, añadió a esa teoría las vocalizaciones de los babuinos, que se podrían haber interpretado como salutaciones al astro rey. Algunos textos procedentes del complejo religioso de Karnak, en las inmediaciones de Luxor, describen cómo los papiones «anuncian» la llegada de Ra, mientras «danzan y brincan para él, clamando con alegría y cantándole sus alabanzas». En opinión de Te Velde, es probable que se los tuviera por sagrados porque parecían comunicarse directamente con Ra; los egipcios habrían apreciado en el júbilo y el lenguaje inescrutable de estos simios una prueba de su saber religioso.

Las teorías de Thomas y Te Velde sobre el origen de la atracción que este animal despertaba



Pintura mural en la tumba tebana n.º 100, fechada entre 1479 y 1425 a.C. La fila superior representa una procesión procedente de Nubia, que desfila con un papión sagrado, entre otros animales y artículos exóticos (*fotografía*). Estas mercancías de lujo se importaban del reino de Punt, que las últimas investigaciones sitúan en las riberas meridionales del mar Rojo (*mapa*)

en los egipcios son fascinantes, pero ¿son verosímiles? ¿De veras prestan los papiones especial atención al sol naciente? ¿Y actúa de manera distinta, en este sentido, el papión sagrado? Ni Thomas ni Te Velde sabían gran cosa sobre el comportamiento de los primates, y ningún primatólogo había analizado sus ideas. Pero ahora disponemos de nuevos datos.

Muchos animales disfrutan tomando el sol. La mayoría de los biólogos cree que así minimizan el coste energético de recalentar el cuerpo después de la noche. Los lémures de cola anillada de Madagascar, por ejemplo, suelen sentarse al sol en una postura parecida a la flor de loto yóguica, pero con las piernas estiradas. Alison Jolly, primatóloga ya fallecida, comentó en una ocasión que, según las leyendas malgaches, los lémures adoran el sol y extienden los brazos en sus plegarias. En 2016, Elizabeth Kelley, directora ejecutiva del Instituto WildCare, adscrito al zoo de San Luis en Misuri, observó que los baños de sol de este lémur guardan una estrecha relación con las bajas temperaturas nocturnas. Su equipo también ha descubierto que la piel del tórax y el abdomen contiene más melanina que la de la espalda, al revés que en la mayoría de los mamíferos. La melanina es un pigmento que absorbe la luz y cuya acumulación en la región abdominal no solo favorece el calentamiento del cuerpo, sino también la digestión.

Los estudios primatológicos realizados en los últimos años indican que los papiones obtienen los mismos beneficios de tomar el sol. La microbiota que puebla su intestino es indispensable para la digestión de la materia vegetal. Si la



temperatura corporal sube, también aumenta la actividad microbiana, lo cual incrementa, a su vez, la absorción intestinal de nutrientes. Asolearse, pues, es una forma fácil y eficaz de activar los microbios de buena mañana. El beneficio es doble: en primer lugar, la propia digestión genera calor, lo cual reconforta el cuerpo; y en segundo lugar, si el frío nocturno ha ralentizado la digestión durante el sueño, lo más eficiente y prudente es acabar de digerir la cena antes de ir en busca del desayuno.

SANDRO VANNINI (*mural*); DOLLY HOLMES (*mapa*)

Es razonable, por tanto, que algunas especies de primates tomen el sol más que otras, según su hábitat y su alimentación. El papión sagrado vive en parajes áridos a lo largo del Cuerno de África y parte de la península arábiga. El límite occidental de su área de distribución coincide con el límite oriental del área de *P. anubis*, en el valle etíope del río Awash. Así pues, este es un lugar propicio para estudiar las diferencias ecológicas y etológicas entre ambas especies. Allí se ha observado que los papiones sagrados consumen más hojas que los oliva, por lo que su alimentación es más rica en fibra.

En teoría, dadas las diferencias alimentarias, la cantidad y el tipo de microbios que ambos papiones precisan para digerir los vegetales tendrían que ser distintos. Esta suposición ha sido confirmada por los estudios de la microbiota de las dos especies realizados recientemente por Steven Leigh, de la Universidad de Colorado en Boulder, y sus colaboradores, entre los cuales me cuento. Hemos comprobado que el papión sagrado tiene más microbios que descomponen la celulosa que el papión oliva, lo cual concuerda con su dieta rica en fibra. Y estos hallazgos implican que tomar el sol al amanecer es más ventajoso para el primero.

Nuestros estudios sobre la microbiota de los papiones corroboran la hipótesis de Thomas, según la cual los egipcios habrían presenciado cómo *P. hamadryas* «daba la bienvenida al disco solar». Quizás expliquen también por qué veneraron justo a esta especie: por su ecología alimentaria, su comportamiento matutino habría encajado mejor con las creencias religiosas egipcias.

El reino perdido

Fuese cual fuese el motivo para adorarlo, los antiguos egipcios hicieron grandes esfuerzos por adquirir ejemplares vivos. Su demanda, junto a la de otros bienes de lujo como el oro, el incienso o el marfil, se convirtió en un motor comercial que cambiaría el curso de la historia.

Theodore M. Davis, un pintoresco abogado y financiero estadounidense, descubrió en 1906 cinco momias de *P. hamadryas* en el Valle de los Reyes. Las momias procedían de tumbas atribuidas a Amenofis II o a Horemheb, faraones de la primera dinastía del Imperio Nuevo, una época de gran prosperidad. La tumba del padre de Amenofis II, Tutmosis III, contenía una calavera de *P. hamadryas,* en apariencia desvendada y descartada por los saqueadores, más interesados en joyas y otros objetos preciosos. Aunque los papiones ya aparecían representados en obras de arte egipcias más antiguas, estas momias son los primeros restos físicos conocidos de *P. hamadryas* en Egipto. La repentina aparición de los papiones en tales sepulturas hace pensar que importarlos resultaba muy costoso. Salima Ikram, profesora de egiptología en la Universidad Americana de El Cairo, sostiene que eran mascotas muy queridas, además de símbolos exóticos de estatus. Su presencia en las tumbas de la realeza y la exquisitez de su momificación, en la que se emplearon cantidades prodigiosas del mejor lino, dan cuenta de su valor. Solo los más pudientes se podían permitir esta técnica de conservación para la vida de ultratumba.

El comportamiento matutino de los papiones sagrados encajaba con las creencias religiosas de los egipcios

Con el propósito de averiguar dónde obtenían los egipcios sus papiones sagrados, mis compañeros y yo analizamos dos momias, una de las cuales era la EA6736. Ambas las había comprado Henry Salt, cónsul general británico en Egipto entre 1816 y 1827, y más tarde fueron adquiridas por el Museo Británico. Su antigüedad no se conoce con tanta precisión como la de las momias de Davis, pero se estima que son del Imperio Nuevo por el estilo de los vendajes y porque proceden de templos tebanos.

Los textos e inscripciones de la época indican que los egipcios partían del puerto de Mersa Gawasis en expediciones marítimas al fabuloso reino de Punt, el cual rebosaba de mercancías lujosas y, según se decía, se encontraba en la remota «tierra de dios». La trascendencia de Punt para la historia mundial es notable. El historiador británico John Keay describe la ruta marítima hasta Punt como el primer tramo largo de la ruta de las especias, una red comercial que impulsó el progreso de la náutica y configuró los



ZOONAR GMBH/ALAMY

Papio hamadryas **es la única especie de papión divinizada por los antiguos egipcios.**

destinos geopolíticos durante milenios. Pero hay un problema, tal como señaló en 1997 el arqueólogo Jacke Phillips: «Nadie ha situado con certeza el reino de Punt en un mapa, y jamás se han descubierto restos arqueológicos que se puedan considerar "puntitas", ni siquiera con la mayor de las reservas».

Si los egipcios obtenían los papiones sagrados de Punt, se podría trazar el origen geográfico de las momias para situar el emplazamiento del enigmático reino. Por suerte, es posible reconstruir los movimientos que siguieron durante su vida los papiones momificados examinando la composición química de sus tejidos. Nosotros hemos estudiado el estroncio, porque la presencia de ese elemento en la roca varía de un lugar a otro. El estroncio queda retenido en el suelo y el agua, y se introduce en la cadena alimentaria cuando los animales beben esa agua y comen las plantas que han crecido en ese suelo. El elemento se acumula en los dientes en las primeras fases del desarrollo, por lo que puede indicar dónde nació un individuo; en cambio, la cantidad que permanece en los huesos y el pelo va variando a lo largo de la vida, así que puede revelar dónde vivía ese individuo cuando murió.

Hemos comparado el estroncio presente en los huesos y dientes de las momias con el de los papiones vivos de diversas regiones de África. El análisis espacial de estos perfiles químicos indica que los animales nacieron fuera de Egipto, en la región sur del mar Rojo, ocupada hoy en día por Etiopía, Eritrea, Yibuti y Somalia. El resultado es gratificante, porque los historiadores han señalado estas áreas como la posible ubicación del reino de Punt, a tenor de los escritos conservados y de la flora y fauna reproducidas en el arte mural egipcio. Uno de los puntos fuertes de nuestro estudio es que sitúa Punt dentro del ámbito territorial de *P. hamadryas*.

La constatación de que los papiones eran importados desde el extremo meridional del mar Rojo atestigua lo lejos que llegaron en el segundo milenio a.C. los navegantes egipcios: fueron capaces de recorrer 1300 kilómetros (y otros tantos de vuelta) en embarcaciones abiertas sin quilla ni timón, en un viaje, sin duda, plagado de peligros. Quizá no es casualidad que una de las narraciones más conocidas de la literatura egipcia sea *El cuento del náufrago*, cuyo protagonista se ve arrastrado hasta la orilla de una isla mágica en el mar Rojo.

Todavía queda mucho por desentrañar sobre las creencias religiosas y las prácticas comerciales del antiguo Egipto. A medida que avanzamos, sería útil analizar el comportamiento matutino y la melanización del papión sagrado, para ver si avalan la hipótesis de su especial dependencia del sol matinal. Nuestro trabajo también subraya la importancia de buscar en Eritrea y los países aledaños restos arqueológicos que den fe de la ubicación de Punt, como, por ejemplo, productos de origen egipcio.

Cabe preguntarse qué pensarían los comerciantes puntitas acerca de la obsesión egipcia por los papiones. Es tentador especular que trocarían con gusto una alimaña por los refinados artículos de Egipto. En todo caso, es esa idiosincrasia cultural la que nos permite hoy arrojar luz sobre una de las rutas mercantiles más importantes de la historia de la humanidad.

Nathaniel J. Dominy es primatólogo y biólogo evolutivo en el Colegio Universitario Dartmouth, en Nuevo Hampshire, EE.UU. Investiga en ecología, etología y morfología. funcional de los primates.



EN NUESTRO ARCHIVO

La influencia de la vida social en la salud. Lydia Denworth en *IyC*, septiembre de 2019.

LOS BENEFICIOS DE RECICLAR LA ORINA

Chelsea Wald | Separar la orina del resto de las aguas residuales podría solventar algunos retos ambientales complejos y aportar una fuente sostenible de abonos



MAK/GEORG MAYER/EOOS NEXT

En Gotland, la mayor isla de Suecia, el agua dulce es escasa. Además, sus habitantes se enfrentan a un peligroso nivel de contaminación procedente de la agricultura y del sistema de alcantarillado, que genera una proliferación perjudicial de algas en el mar Báltico que la rodea. Esta puede matar a los peces y hacer enfermar a las personas.

Para ayudar a resolver esta serie de amenazas ambientales, la isla se está encomendando a una única e insospechada sustancia que los une: la orina humana.

En 2021, un equipo de investigadores empezó a colaborar con una empresa local que alquila retretes portátiles. El objetivo es recoger, durante la bulliciosa temporada turística veraniega y a lo largo de tres años, más de 70.000 litros de orina procedentes de inodoros sin agua y de váteres especializados ubicados en varios emplazamientos. El equipo pertenece a la Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia (SLU), en Uppsala, que ha creado una empresa llamada Sanitation360. Mediante un proceso desarrollado por los investigadores, secan la orina para obtener bloques similares al hormigón que luego trituran hasta convertirlos en un polvo que compactan en gránulos de abono aptos para los equipos agrícolas habituales. Un agricultor local aplica el fertilizante para cultivar cebada, que es transportada a una fábrica de elaboración de cerveza que, tras ser ingerida, puede volver de nuevo al ciclo.

Los científicos pretenden llevar la reutilización de la orina «del concepto a la práctica» a gran escala, explica Prithvi Simha, ingeniero de procesos químicos de la SLU y director técnico de Sanitation360. La meta es brindar un modelo que puedan copiar regiones de todo el planeta. «Nuestro anhelo es que todo el mundo, en cualquier lugar, pueda adoptar esta práctica.»

El proyecto de Gotland pertenece a una serie de esfuerzos internacionales similares para separar la orina del resto de las aguas residuales y reciclarla en productos tales como los abonos. Esta práctica está siendo examinada por diversos grupos en los Estados Unidos, Australia, Suiza, Etiopía y Sudáfrica, entre otros.

Los esfuerzos rebasan con mucho los confines de los laboratorios universitarios. Oficinas de Oregón y de los Países Bajos cuentan con urinarios sin agua conectados a sistemas de tratamiento situados en el sótano. En París,

En síntesis

La separación y el reciclado de la orina, si se instaurara a gran escala, supondría enormes beneficios ambientales y de salud pública. En lugar de contaminar las masas de agua, la orina transformada podría destinarse a abonar los cultivos o a alimentar los procesos industriales.

Gracias a los avances en inodoros y estrategias de tratamiento, la separación y el reciclado podrían estar a punto en breve para su puesta en marcha.

Sin embargo, deben superarse obstáculos sociales y culturales de gran calado para remodelar de modo drástico una de las principales formas de saneamiento.

se planea la instalación de inodoros con separación de orina en un ecobarrio residencial para 1000 habitantes que se está erigiendo en el distrito 14 de la ciudad. La Agencia Espacial Europea prevé colocar en su sede parisina 80 de estos retretes que empezarán a estar operativos este mismo año. Los defensores de la separación de la orina sostienen que su uso es viable en numerosos contextos: desde bases militares temporales hasta campos de refugiados, florecientes centros urbanos o suburbios en expansión.

Los científicos aseveran que la separación de la orina supondría enormes beneficios ambientales y de salud pública si se instaurara a gran escala por todo el mundo. En parte, ello se debe a que es rica en nutrientes que, en lugar de contaminar las masas de agua, podrían destinarse a abonar los cultivos o alimentar los procesos industriales. De acuerdo con los cálculos de Simha, los humanos producimos suficiente orina como para reemplazar alrededor de un cuarto de los abonos de nitrógeno y fósforo empleados hoy en día en todo el planeta; también contiene potasio y numerosos micronutrientes. Por si fuera poco, dejar de tirar de la cadena podría ahorrar una cantidad ingente de agua y reducir alguna de la presión que asumen los antiguos y sobrecargados sistemas de alcantarillado.

Gracias a los avances en inodoros y estrategias de tratamiento, los expertos señalan que muchos elementos de la separación de la orina podrían en breve estar a punto para su puesta en marcha generalizada. Con todo, también existen obstáculos notables para re-

modelar de forma radical uno de los aspectos más básicos de la vida. Los investigadores y las empresas necesitan resolver una serie de problemas, desde la mejora del diseño de los retretes con separación de la orina hasta facilitar el tratamiento de la misma para transformarla en productos valiosos. Ello podría requerir sistemas de tratamiento químico conectados a cada taza o dispositivos situados en el sótano para dar asistencia a edificios enteros, con servicios de recogida y mantenimiento del producto concentrado o solidificado resultante. Se suman, asimismo, cuestiones de mayor calado de cambio y aceptación social, derivadas tanto de tabúes culturales de distinto grado en torno a la orina humana como a costumbres profundamente arraigadas sobre las aguas residuales industriales y los sistemas alimentarios.

La separación y la reutilización de la orina es una forma de «repensar radicalmente el saneamiento» que adquirirá cada vez mayor relevancia a medida que las sociedades se enfrenten a la escasez de energía, agua y materias primas destinadas a la agricultura y la industria, subraya la bióloga Lynn Broaddus, consultora en sostenibilidad de Minneapolis (Minnesota) y anterior presidenta de la Federación Ambiental del Agua en Alexandria (Virginia), una asociación internacional de profesionales especialistas en calidad del agua. «Lo cierto es que es un líquido valioso.»

Una nueva clase de inodoro

La orina solía ser un producto preciado. Antaño, algunas sociedades la empleaban para abonar los campos, curtir el cuero, lavar la ropa y producir pólvora. Más adelante, a finales del siglo XIX y a principios del XX, el modelo actual de gestión centralizada de las aguas residuales surgió en Inglaterra y se expandió por todo el mundo, lo que al final ha motivado que vivamos de espaldas a su existencia.

En este modelo, al tirar de la cadena el agua envía rápidamente la orina, las heces y el papel higiénico al alcantarillado, donde se mezclan con otros líquidos domésticos o de fuentes industriales y, a veces, escorrentías pluviales. En las plantas de tratamiento centralizadas, las aguas negras se limpian mediante un proceso con un elevado consumo de energía dependiente de microorganismos.

En función de la normativa local y el estado de la planta de tratamiento, las aguas residuales

En la actualidad vivimos de espaldas a la gestión de las aguas residuales

resultantes de dicho proceso pueden contener todavía mucho nitrógeno y otros nutrientes, así como distintos contaminantes. Y el 57 por ciento de la población mundial ni siquiera está conectada a redes centralizadas de alcantarillado.

Los expertos buscan formas de que los sistemas centralizados sean más sostenibles y menos contaminantes, pero, desde los inicios de los 90, algunos científicos en Suecia empezaron a exigir cambios más esenciales. Los avances acotados al final del proceso son «tan solo otra vuelta de tuerca más a lo mismo de siempre», se lamenta Nancy Love, ingeniera ambiental en la Universidad de Michigan, en Ann Arbor. La separación de la orina sería «transformadora», afirma. En un estudio que modeló los sistemas de gestión de las aguas residuales en tres estados de los EE.UU., ella y sus colaboradores compararon los sistemas tradicionales con otros hipotéticos que separan la orina y emplean los nutrientes recuperados para sustituir los abonos sintéticos. Predijeron que las comunidades con separación de la orina podrían, en función de las técnicas usadas, reducir sus emisiones totales de gases de efecto invernadero en hasta un 47 por ciento, el consumo de energía en hasta un 41 por ciento, el uso del agua dulce en alrededor de la mitad, y la contaminación por nutrientes debida a las aguas negras en hasta un 64 por ciento.

Con todo, el concepto sigue siendo minoritario, en su mayoría circunscrito a comunidades sin conexión a la red, como las ecoaldeas del norte de Europa, las fosas sépticas rurales y los proyectos de desarrollo en entornos de ingresos bajos.

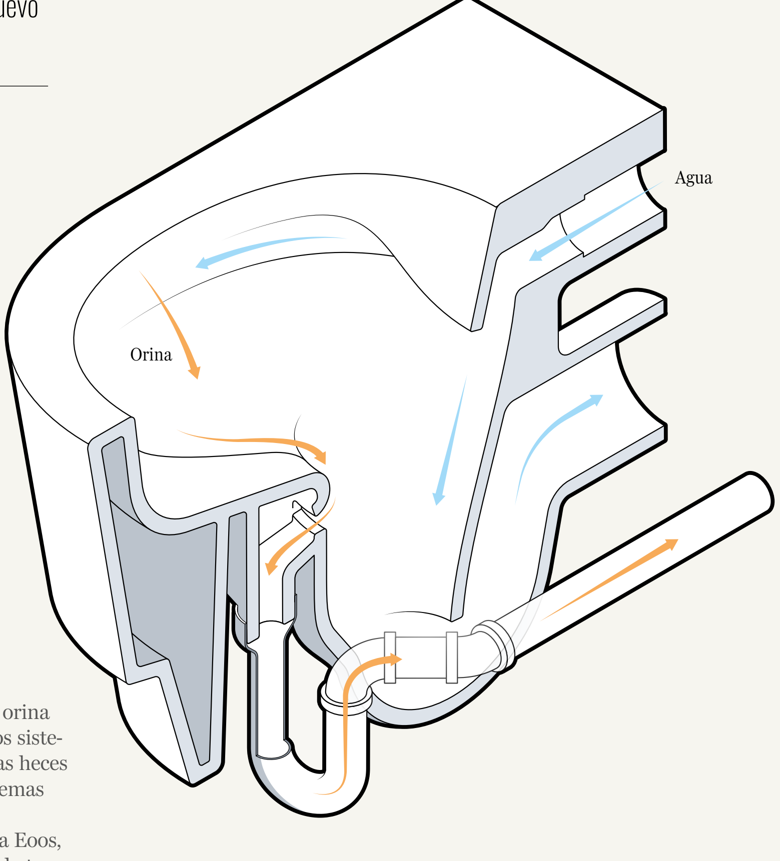
Gran parte del lastre se debe a los inodoros en sí, explica Tove Larsen, ingeniera química del Instituto Federal Suizo de Ciencias y Tecnología Acuáticas (Eawag), en Dübendorf. Comercializados por primera vez en la década de los 90 y los 2000, la mayoría de los inodoros con separación de la orina cuentan con un pequeño cuenco en su parte delantera para recoger el líquido, un diseño que exige una avezada puntería. Otros modelos han incorporado una cinta transporta-

CÓMO RECICLAR LA ORINA

Los inodoros arrojan nitrógeno valioso y otros fertilizantes por las tuberías. Aquí explicamos cómo capturar de nuevo algunos de los recursos perdidos de la orina humana.

La orina es un líquido valioso y abundante. Cada persona produce unos 500 litros por año. La orina representa tan solo el 1% de las aguas residuales domésticas, pero contiene entre el 80 y 90% del nitrógeno, y al menos la mitad del fósforo y el potasio, según algunos estudios. Ante el rápido crecimiento de la población humana y el constante aumento de la demanda de abonos, reciclar la orina puede ser la mejor opción y, además, evitaría la contaminación de los cursos de agua por algunos de los nutrientes. Algunas comunidades están liderando el camino instalando inodoros especializados y reciclando la orina.

Por Richard Monastersky y Chelsea Wald



Una nueva clase de inodoro

La clave para recuperar los nutrientes de la orina es separarla del resto de flujo de residuo. Los sistemas varían desde los que tratan la orina y las heces in situ hasta los que están conectados a sistemas de aguas residuales de mayor extensión. En el diseño Urine Trap de la empresa austríaca Eoos, la orina desciende por la parte delantera de la taza y fluye por la cara interna a una tubería separada.

De la orina a los productos

Los investigadores están explorando varias vías para convertir la orina en un material valioso, como los abonos.

❶ En las zonas rurales, en especial en las áreas de rentas bajas, los agricultores pueden «madurar» la orina en contenedores para eliminar los patógenos y luego aplicarla al campo.

Uso directo en agricultura

Tanque de almacenamiento

❷ Algunos inodoros con separación de la orina pueden conectarse a nuevos tipos de sistemas que extraen sus compuestos valiosos, de forma que se recojan y transporten fácilmente a las instalaciones a fin de transformarlos en productos.

Tratamiento y almacenamiento in situ

Vehículo de recogida

Granjas, fábricas y otras instalaciones

❸ Los inodoros autónomos con separación de la orina y secador integrado pueden instalarse en los baños sin añadir tuberías.

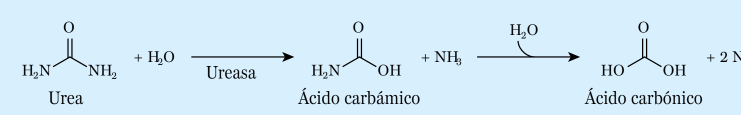
Unidad de recogida

Aguas residuales

❹ En oficinas o edificios residenciales nuevos o renovados, una red de tuberías distinta puede transportar la orina al sótano, donde un sistema se encarga de su tratamiento y concentración para su posterior recogida.

Sistema de tratamiento

La enzima ureasa cataliza una rápida reacción que transforma la urea de la orina en amoníaco, un gas maloliente. Muchos sistemas con separación de la orina inhiben esta reacción.



¿Lo consumiría la gente?

En una encuesta de más de 3700 personas en universidades de 16 países, el 59% declaró que comería alimentos abonados con orina, si bien se registró un amplio abanico de aceptación.

Media total 59%

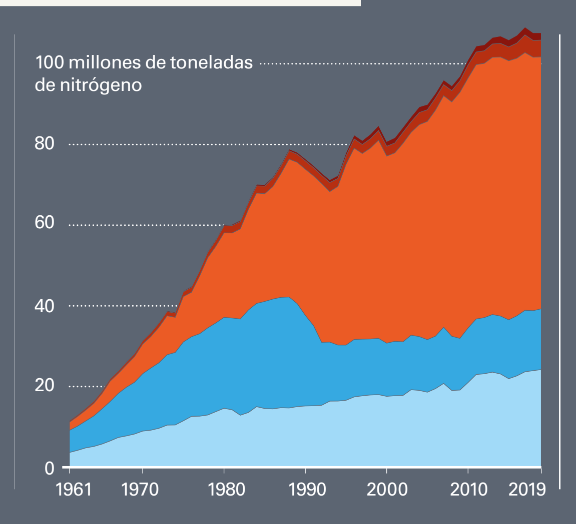


Bangladés	**38%**
Brasil	**61%**
China	**78%**
Etiopía	**51%**
Francia	**80%**
Grecia	**50%**
India	**38%**
Israel	**59%**
Jordania	**14%**
Malasia	**43%**
Moldavia	**27%**
Polonia	**47%**
Portugal	**29%**
Taiwán	**56%**
Uganda	**78%**
Estados unidos	**61%**

El problema de la orina

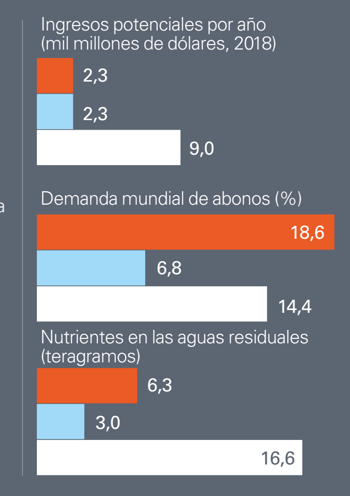
Demanda de nitrógeno
La cantidad de nitrógeno empleada en agricultura se ha multiplicado por más de ocho en los últimos sesenta años. La mayoría se sintetiza mediante un proceso con un elevado consumo de energía que depende de combustibles fósiles.

- Oceanía
- África
- Asia
- Europa
- América



Composición de la orina
Un estudio sobre las aguas residuales urbanas a escala mundial apunta a que contiene suficiente nitrógeno, fósforo y potasio para satisfacer más del 13 % de la demanda de abonos agrícolas. El valor de estos nutrientes recuperados equivaldría a 13.600 millones de dólares al año.

- Potasio
- Fósforo
- Nitrógeno



Contaminación futura
El nivel de contaminación por nitrógeno y fósforo que afecta a las aguas superficiales crece con rapidez, según un estudio de modelización que explora posibles escenarios futuros.

Escenarios:
- Camino gradual hacia la sostenibilidad
- Mitad del camino
- Mundo fragmentado
- Aumento de la brecha de desigualdad
- Innovación y sostenibilidad

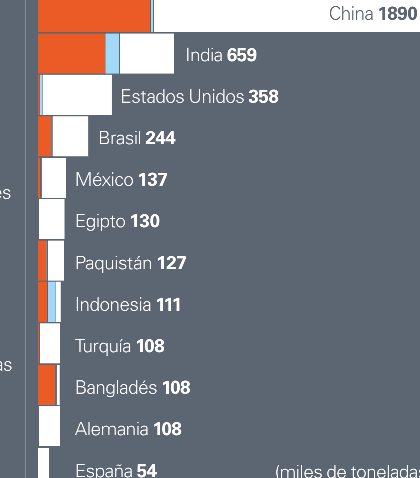
Nitrógeno (teragramos): 20, 15, 10, 5, 0; 1970, 2010, 2050

Fósforo (teragramos): 3, 2, 1, 0; 1970, 2010, 2050

Aguas residuales humanas
Un estudio de modelización apunta a que las aguas residuales vierten 6,2 millones de toneladas de nitrógeno a las aguas costeras de todo el mundo. Estas son las principales responsables.

Fuentes de nitrógeno de aguas residuales que contaminan las aguas costeras*:
- Ausencia o acceso muy limitado a letrinas
- Fosas sépticas
- Alcantarillado con tratamiento

*Zona económica exclusiva de un país.



FUENTES: C. ROSE ET AL. *CRIT. REV. ENVIRON. SCI. TECHNOL.* 45, 1827–1879, 2015/EAWAG/ D. G. RANDALL Y V. NAIDOO *J. ENVIRON. CHEM. ENG.* 6, 2627–2635, 2018 (*introducción*); S. SVANE ET AL. *SCI. REP.* 10, 8503, 2020 (*ureasa*); FAO (*demanda de nitrógeno*); M. QADIR ET AL. *NAT. RESOUR. FORUM* 44, 40–51, 2020 (*composición de la orina*); P. J. T. M. VAN PUIJENBROEK ET AL. *J. ENVIRON. MGMT* 231, 446–456, 2019 (*contaminación*); C. TUHOLSKE ET AL. *PLOS ONE* 16, E0258898, 2021 (*aguas residuales humanas*). P. SIMHA ET AL. *SCI. TOTAL ENVIRON.* 765, 144438, 2021 (*alimentos abonados*). Jasiek Krzysztofiak (*diseño de la infografía*)

dora accionada por el pie que deja fluir la orina mientras mueve las heces a un compostador, o bien sensores que accionan unas válvulas para dirigir la orina a un desagüe independiente.

Sin embargo, los proyectos piloto y de demostración europeos pusieron de manifiesto la reticencia que mostraba la gente a adoptar su uso, indica Larsen, alegando su difícil manejo, mal olor y poca fiabilidad. «El tema de los retretes nos ha llevado, sin duda, a un punto muerto.»

Estos recelos arruinaron el primer plan a gran escala para emplear inodoros con separación de la orina, un proyecto de la década de los 2000 en el barrio sudafricano de eThekwini. Tras el *apartheid*, las fronteras del distrito se expandieron de repente, lo que instó a las autoridades a asumir la responsabilidad de algunas zonas rurales desfavorecidas sin acceso a letrinas y con un escaso servicio de agua, explica Anthony Odili, que estudia la gobernanza en materia de saneamiento en la Universidad de KwaZulu-Natal en Durban.

Tras el brote de cólera que se declaró en la zona en agosto de 2000, las autoridades instalaron con rapidez distintos tipos de sistemas de saneamiento acordes con las limitaciones económicas y prácticas. Se introdujeron unos 80.000 inodoros secos con separación de la orina, la mayoría de los cuales siguen funcionando hoy en día. La orina circula por debajo del inodoro infiltrándose en el suelo, y las heces desembocan en una cámara que, desde 2016, el distrito vacía cada cinco años.

El proyecto fue un éxito en lograr un saneamiento más seguro en la región, relata Odili. Sin embargo, las investigaciones en ciencias sociales han desvelado una retahíla de problemas con el programa. Si bien la población consideró que esos retretes eran mejor que nada, señala Odili, los estudios dejaron entrever más adelante que, por lo general, no eran de su gusto. Muchos de ellos se fabricaron con materiales de mala calidad y utilizarlos resultaba incómodo. Si bien, en teoría, este tipo de inodoro debía evitar los malos olores, la orina de los instalados en eThekwini se colaba a menudo en las cámaras de las heces generando un olor nauseabundo. La gente «no podía respirar bien», se lamenta Odili. Además, la orina sigue en gran medida inexplotada.

Al final, la decisión de optar por inodoros secos con separación de la orina, originada en gran parte por inquietudes en materia de salud pública, fue vertical y pecó de no tener en cuenta las preferencias de los residentes, señala Odili. Un estudio de 2017 desveló que más del 95 por ciento de los encuestados en eThekwini ambicionaban los prácticos retretes con cadena y sin olores de la población blanca y más rica de la ciudad, que muchos tenían la intención de instalar en cuanto se lo permitieran las circunstancias. En Sudáfrica, los inodoros han ejercido durante mucho tiempo de símbolo de desigualdad racial.

Sin embargo, un nuevo diseño podría representar un gran avance en la separación de la orina. En 2017, encabezada por el diseñador Harald Gründl y en colaboración con Larsen, entre otros, la empresa austríaca de diseño Eoos (hoy en día Eoos Next) dio a conocer el modelo Urine Trap, que elimina la necesidad del usuario de apuntar e integra una función de separación de la orina casi invisible.

Este diseño aprovecha la tendencia del agua a aferrarse a las superficies (conocida como el efecto tetera, ya que es el que explica el porqué de la molesta tetera goteante) a fin de que la orina fluya por la cara interna de la parte frontal del inodoro hacia una abertura separada (*véase el recuadro* «Cómo reciclar la orina»). Desarrollado gracias a la financiación de la Fundación Bill y Melinda Gates en Seattle, que ha subvencionado un amplio abanico de investigaciones para innovar en retretes en entornos de ingresos bajos, Urine Trap puede incorporarse a cualquier sanitario, desde un lujoso inodoro de pedestal de cerámica a un váter turco de plástico. Laufen, un fabricante con sede en Suiza, ya está confeccionando uno para el mercado europeo, llamado save!, si bien es demasiado costoso para muchos compradores.

La Universidad de KwaZulu-Natal y el barrio de eThekwini han estado ensayando también versiones de Urine Trap que separan la orina y emplean agua para arrastrar los sólidos. En esta ocasión, la investigación está más centrada en el usuario. Odili se muestra optimista de que la gente preferirá estos nuevos modelos, ya que huelen mejor y son más fáciles de usar, pero señala que los hombres tendrán que orinar sentados, todo un cambio cultural. Con todo, si el retrete «se adopta y es aceptado también en zonas de rentas elevadas, donde vive gente de distintos grupos raciales, ello ayudará sin duda a su implantación», explica. «Nunca debemos olvidar el factor racial», añade, para

cerciorarnos de que no se está desarrollando algo que será percibido como «solo para la gente de raza negra» o «solo para los pobres».

Usos de la orina

Separar la orina es tan solo el primer paso en la transformación del saneamiento. El siguiente es dilucidar qué hacer con ella. En las zonas rurales, se puede almacenar en cubas para eliminar cualquier patógeno y luego aplicarla a los cultivos. La Organización Mundial de la Salud ha elaborado directrices para llevar a cabo esta práctica.

Los entornos urbanos, sin embargo, son más complejos y es justo allí donde se produce la mayor cantidad. No resulta práctico añadir canalizaciones separadas de alcantarillado por toda la ciudad para trasladar la orina a una ubicación central. Y dado que está compuesta por alrededor de un 95 por ciento de agua, es demasiado caro almacenarla y transportarla. Así que los investigadores están centrándose en secar, concentrar o, de algún otro modo, extraer nutrientes de la orina desde el nivel del inodoro o de todo el edificio, dejando atrás el agua.

No es una tarea fácil, indica Larsen. Desde el prisma de la ingeniería, «la orina es una solución fastidiosa», explica. Después del agua, su componente principal es la urea, un compuesto rico en nitrógeno que se sintetiza en el cuerpo como subproducto de la metabolización de las proteínas. La urea en sí es útil: una versión sintética es un abono nitrogenado habitual. La otra cara de la moneda es que cuando se combina con agua, la urea se transforma en amoníaco, que contribuye al olor característico de la orina. Si no se contiene, este gas apesta, contamina el aire y se lleva volando el valioso nitrógeno. Catalizada por la extendida enzima ureasa, esta reacción, llamada hidrólisis de la urea, puede demorar microsegundos, lo cual convierte a la ureasa en una de las enzimas conocidas más eficientes.

Algunas estrategias intentan sacar provecho de la hidrólisis. Investigadores de Eawag han puesto a punto un proceso avanzado para convertir la orina hidrolizada en una solución de nutrientes concentrada. Primero, en un tanque los microorganismos transforman el volátil amoníaco en nitrato de amonio no volátil, un abono frecuente. Luego, un destilador concentra el líquido. Una empresa derivada llamada Vuna, también de Dübendorf, está embarcada en la comercialización tanto del sistema, destinado a los edificios, como del producto, denominado Aurin, que ha sido autorizado en Suiza para su uso en plantas comestibles, toda una novedad mundial.

> El reciclado de la orina será cada vez más relevante a medida que aumente la escasez de energía, agua y materias primas para la agricultura y la industria

Otros métodos intentan impedir la reacción de hidrólisis aumentando o disminuyendo con rapidez el *p*H de la orina, que suele ser neutro cuando abandona el cuerpo. En el campus de la Universidad de Michigan, una colaboración entre Love y el instituto sin fines de lucro Rich Earth, en Vermont, está desarrollando un sistema concebido para los edificios que vierte ácido cítrico líquido en las tuberías de un inodoro con separación de la orina y un orinal sin agua. A continuación, la orina se concentra mediante etapas repetidas de congelación y descongelación.

El equipo de la SLU a cargo del proyecto en la isla de Gotland, dirigido por el ingeniero ambiental Björn Vinnerås, ha resuelto cómo secar la orina para obtener urea sólida mezclada con otros nutrientes. El grupo está evaluando su último prototipo, un inodoro autónomo con un secador integrado, en la sede central de VA SYD, compañía pública sueca de suministro de agua y tratamiento de aguas residuales, en Malmö.

Otros métodos se centran en los nutrientes individuales de la orina. Estos podrían introducirse más fácilmente en las cadenas de suministro existentes de fertilizantes y productos químicos industriales, explica el ingeniero químico William Tarpeh, antiguo investigador posdoctoral de Love que ejerce ahora en la Universidad Stanford, en California.

Un método bien establecido para recuperar el fósforo de la orina hidrolizada es añadir magnesio, que desencadena la precipitación de un abono llamado estruvita. Tarpeh, además, está investigando con gránulos de materiales adsorbentes que extraen de forma selectiva el nitrógeno en forma de amoníaco o el fósforo en forma de fosfato. Su sistema recurre a otro líquido, llamado regenerante, que circula por encima de los gránulos una vez empleados. El regenerante arrastra los nutrientes y renueva los gránulos para un nuevo uso. Es un método pasivo de baja tecnología, pero los regenerantes comerciales son perjudiciales para el ambiente. Su equipo está ahora intentando obtener unos más baratos y respetuosos con el entorno.

Otros investigadores están volcados en formas de generar electricidad introduciendo orina en células de combustible microbianas. En Ciudad del Cabo, otro grupo ha puesto en marcha un método para fabricar un insólito ladrillo de construcción combinando orina, arena y bacterias productoras de ureasa en un molde; este se endurece adoptando cualquier forma sin necesidad de cocción. Asimismo, la Agencia Espacial Europea está sopesando el uso de la orina de los astronautas como recurso para construir asentamientos en la Luna.

«Cuando pienso en el futuro en mayúsculas de la recuperación de la orina y las aguas residuales, a lo que aspiramos es a ser capaces de obtener tantos productos como sea posible», afirma Tarpeh.

Mientras exploran una serie de ideas que conviertan la orina en una mercancía, los investigadores son conscientes de que la batalla será ardua, en especial en los sectores arraigados. Las empresas de abonos y alimentos, los agricultores, los fabricantes de inodoros y los reguladores son lentos a la hora de adoptar grandes cambios en sus prácticas. «Existe una gran inercia», advierte Simha.

En la Universidad de California en Berkeley, por ejemplo, una instalación con fines de investigación y formativos del inodoro save! de Laufen, dotado de un tubo de desagüe a un tanque de almacenamiento en el piso de abajo, ha requerido contra todo pronóstico casi tres años y un coste que ha superado los 50.000 dólares. Esta cifra se ha destinado a los arquitectos, la construcción y el cumplimiento de los protocolos municipales, explica el ingeniero ambiental Kevin Orner, de la Universidad de Virginia Occidental. Y la obra todavía no ha finalizado. La ausencia de protocolos y normativas ha entorpecido la gestión de las instalaciones, señala, motivo que le ha llevado a formar parte de un panel que está redactando nuevos protocolos.

Parte de la inercia puede estar motivada por inquietudes en torno a la reticencia de los consumidores, si bien una encuesta de 2021 realizada en 16 países puso de manifiesto que la voluntad de consumir alimentos fertilizados con orina rozaba el 80 por ciento en países como Francia, China y Uganda.

Pam Elardo, que dirige la Agencia de Tratamiento de Aguas Residuales como comisionada adjunta del Departamento de Protección Ambiental de la ciudad de Nueva York, manifiesta su apoyo a innovaciones como la separación de la orina, ya que una mayor reducción de la contaminación y la recuperación de recursos son objetivos clave de la agencia. La estrategia más práctica y rentable para una ciudad como Nueva York, anticipa, serían sistemas sin conexión a la red en edificios nuevos o renovados con servicios de recogida y mantenimiento. Si los expertos pueden solventarlo, añade, «debería apostarse por ello».

Habida cuenta de los avances, Larsen prevé que la producción a gran escala y la automatización de las técnicas de separación de la orina puedan estar a la vuelta de la esquina, lo que mejoraría los casos de negocio para esta transformación en el tratamiento de los residuos. La separación de la orina «es la estrategia correcta», afirma. «Es la única que puede dar respuesta al problema de los nutrientes de los hogares en un tiempo razonable. Pero la gente ha de atreverse.»

Chelsea Wald es periodista independiente y autora del libro *Pipe dreams: The urgent global quest to transform the toilet*, Avid Reader Press, 2021



Con la colaboración de **nature**

Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado por Investigación y Ciencia con el permiso de Nature Research Group© 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

El problema global del nitrógeno. Alan R. Townsend y Robert W. Howarth en *IyC*, abril de 2010.
Gestión desinformada. Blanca Jiménez Cisneros en *IyC*, marzo de 2014.
Reutilización de aguas residuales. Olive Heffernan en *IyC*, septiembre de 2014.
Depuración natural de aguas residuales. Cristina Ávila, Víctor Matamoros y Joan García en *IyC*, febrero de 2016.

UNA BIOSFERA EN UN BOTE

Marc Boada Ferrer | Construir en el laboratorio un ecosistema cerrado y autónomo es una actividad altamente pedagógica

El estudio científico de los seres vivos en su amplia diversidad, o incluso su simple contemplación, pueden resultar de lo más placentero y estimulante. Quizá por ello son muchas las escuelas que adornan sus aulas con peceras, terrarios o, cuando menos, plantas en macetas.

Lamentablemente —entiéndase esto como una simple broma—, ello comporta mucho trabajo. A diferencia de los sistemas físicos, que podemos dejarlos en un determinado lugar del laboratorio y cuando regresamos a la mañana siguiente todo sigue igual, en los sistemas vivos el cambio es permanente e inexorable, y esto —insisto— conlleva mucho esfuerzo, aplicación y compromiso por parte del experimentador.

Por ejemplo, si construimos y mantenemos un acuario, debemos filtrar continuamente el medio líquido, eliminar algas de los cristales, controlar el *p*H, aportar nutrientes, eliminar especies invasoras, controlar brotes epidémicos y reemplazar los ejemplares perdidos. Y lo mismo podría decirse de un terrario o de un cultivo vegetal de cualquier tipo. Todo investigador sabe que, si deja de cuidar todos estos aspectos, se enfrenta a una auténtica catástrofe —¡cuántas veces hemos vuelto de vacaciones y aquello que estaba vivo ha perecido!—. Naturalmente, ante tamaño problema, muchos han buscado soluciones parciales pero muy interesantes tanto desde el punto de vista científico como pedagógico.

Detengámonos a reflexionar unos instantes. Si consiguiéramos poner a disposición permanente de nuestras mascotas todo aquello que necesitaran para medrar correctamente, podríamos olvidarnos de ellas sabiendo que conseguirían subsistir y desarrollar sus ciclos biológicos para solaz y regocijo del observador científico. Es una perogrullada, pero «alguien» ya lo ha conseguido: la naturaleza, que, en su azarosa evolución, ha «creado» una biosfera casi cerrada, la Tierra, que cumple con todos los parámetros que antes enumerábamos. Fijémonos bien en la «piel» de nuestro pequeño planeta. Una increíblemente compleja red de seres vivos que procesan un sustrato químico igualmente rico, animada solo, o casi, por la entrada continua de radiación solar. Pues bien, ese es nuestro objetivo en esta ocasión. Nos proponemos la emulación, o la reproducción a escala ínfima, de un ecosistema completo que pueda subsistir por su cuenta tanto tiempo como sea posible sin intervención alguna.

Empecemos con una descripción somera. La idea básica consiste en tomar un recipiente hermético (o casi), en el cual vamos a acomodar cierta diversidad viva. Olvidémonos ya de

■ EL EXPERIMENTO
Reproduciremos, en el interior de grandes botes de cristal, pequeños ecosistemas autónomos.

■ MATERIALES
Botes de cristal grandes
Carbón granulado
Sepiolita
Tierra de bosque
Plantas de interior

■ PRECIO APROXIMADO
Unas decenas de euros

■ TIEMPO
Fase de construcción: unas horas
Fase de observacion: meses o años

■ DIFICULTAD
Baja



Biosfera en dos piezas: Una pecera de cristal esférica soportada por una fuente cilíndrica en la cual se han dispuesto los diversos sedimentos.

entrada de mantener cerrados organismos superiores. Eso sería, en primer lugar, poco ético y, en segundo lugar, casi imposible —o no—. (En teoría, si dispusiéramos de un espacio suficientemente grande podríamos sostener cualquier ecosistema. Decimos «en teoría» porque ya se ha intentado y los resultados no han sido los previstos. Proyectos de biosferas cerradas herméticamente de cientos de metros de extensión, en el interior de las cuales diversos experimentadores han intentado subsistir alimentándose de pequeños ecosistemas han tenido serias dificultades. (Hallamos un ejemplo en Biosphere 2, una estructura construida por Space Biosphere Ventures entre 1987 y 1991 en Oracle, Arizona, para estudiar la viabilidad de biosferas cerradas en la colonización espacial.) Nosotros seremos mucho menos ambiciosos y nos conformaremos con recrear en un recipiente de sobremesa un mundo fundamentalmente vegetal. En ese bote biosférico pondremos nutrientes, agua, plantas y una diversidad microbiana suficiente como para que la vida se abra paso.

Empecemos, pues, por buscar un bote de cristal bien grande, como mínimo de tres litros de capacidad. Nos servirá el modelo «de mermelada» con tapa de rosca metálica, del que encontraremos versiones de hasta 10 litros de capacidad o más. También hay botes de cristal de gran tamaño con tapa del mismo material, cierre de palanca y junta de goma para garantizar el hermetismo. Otra opción pasa por olvidar el bote hermético (luego volveremos a este detalle) y buscar un conjunto de dos piezas, como el que aquí ilustramos, que consiste en una pecera casi esférica y una fuente de cristal casi cilíndrica. Obsérvese que la pecera encaja en la fuente por su interior.

Vemos, pues, que hay varias posibilidades que nos abren la puerta a una reflexión: ¿hasta qué punto nuestro bote biosférico debe ser hermético? ¿Cómo de puristas debemos ser a la hora de aislar nuestro ecosistema? ¿Podemos permitir un suave intercambio de gases y vapores entre el interior y el exterior? Pues... depende. Ya anticipamos que el control de la humedad es el punto más crítico de este experimento. Una humedad excesiva en un bote hermético determina, a meses vista, un florecimiento espectacular de la diversidad fúngica y un estrés brutal para la vegetal, que acaba siendo pasto de los hongos o medrando muy a duras penas. En cambio, un recipiente no hermético y que se pueda abrir fácilmente permite una mayor transpiración y, además, una limpieza de tanto en tanto.

Con los botes seleccionados, llega el momento de preparar el sustrato. Tal y como pasa en la naturaleza, un suelo rico puede sostener una comunidad vegetal diversa. Por tanto, debemos crear un suelo que aporte varios elementos y funciones: intercambio de gases metabólicos, nutrientes, control de la humedad, espacio para el desarrollo de microorganismos, absorción de sales y consistencia estructural, por citar los más importantes.

En el bote perfectamente límpido colocaremos capas de diversos áridos. En primer lugar, y sobre el cristal del fondo, una capa de sepiolita (la grava fina que ponemos en el baño de nuestro gato) de unos pocos milímetros de espesor. Luego una capa un poco más espesa de carbón activo o carbón vegetal triturado. Estos dos materiales (sepiolita y carbón) se van a encargar de absorber parte de la humedad, de retener el exceso de sales solubles y de fijar compuestos de molécula larga; asimismo (como ya se ha comprobado en los cultivos a gran escala), proveerán de microporos, en los cuales se instalarán colonias de bacterias y toda una pléyade de organismos microscópicos.

Sobre estas dos capas, y con un colador de cocina, tamizaremos arena silícea, casi inerte. Esta rellenará, en parte, los espacios que quedan entre los granos de carbón y sepiolita, lo cual conferirá mayor rigidez al conjunto. Con ello habremos configurado la base de nuestro experimento biológico.

Antes de proseguir, reparemos en que en esta fase del experimento ya habremos determinado el biotopo donde crecerá nuestra biosfera, puesto que el bote y los sustratos inertes que ya hemos colocado, junto con las condiciones climáticas del lugar donde lo situemos determinarán las condiciones físicas del entorno, es decir, el biotopo.

Centrémonos ahora en la parte viva del experimento, el conjunto de poblaciones biológicas que coexistirán en nuestro bote, la biocenosis. Comencemos por la siguiente capa. Sobre el sustrato inerte (de sepiolita, carbón y arena) colocaremos una capa de tierra vegetal. De tierras hay muchas, pero no todas sirven. Debemos escoger la más adecuada para lo que queremos «plantar». Las especies vegetales de suelos ácidos resisten mal en tierras alca-

linas, y viceversa. Por ello vamos a empezar por seleccionar las plantas más adecuadas a nuestros propósitos.

¿Qué tipo de ecosistema queremos construir? ¿Y si creamos uno de tipo árido, o casi desértico? Ello nos permitiría ser muy espartanos en todo, lo que simplificaría mucho las cosas. Además, hay especies bellísimas de cactus, plantas crasas y similares. Lo más práctico en este caso es visitar varias floristerías y comprar varias muestras. Otra posibilidad, que es en la que me he centrado, es la de recrear los ambientes vegetales más umbríos de mi entorno (el Parque Natural del Montseny), dominados por musgos y helechos. En este caso, recojo las plantas en plena naturaleza junto con la tierra que las acompaña.

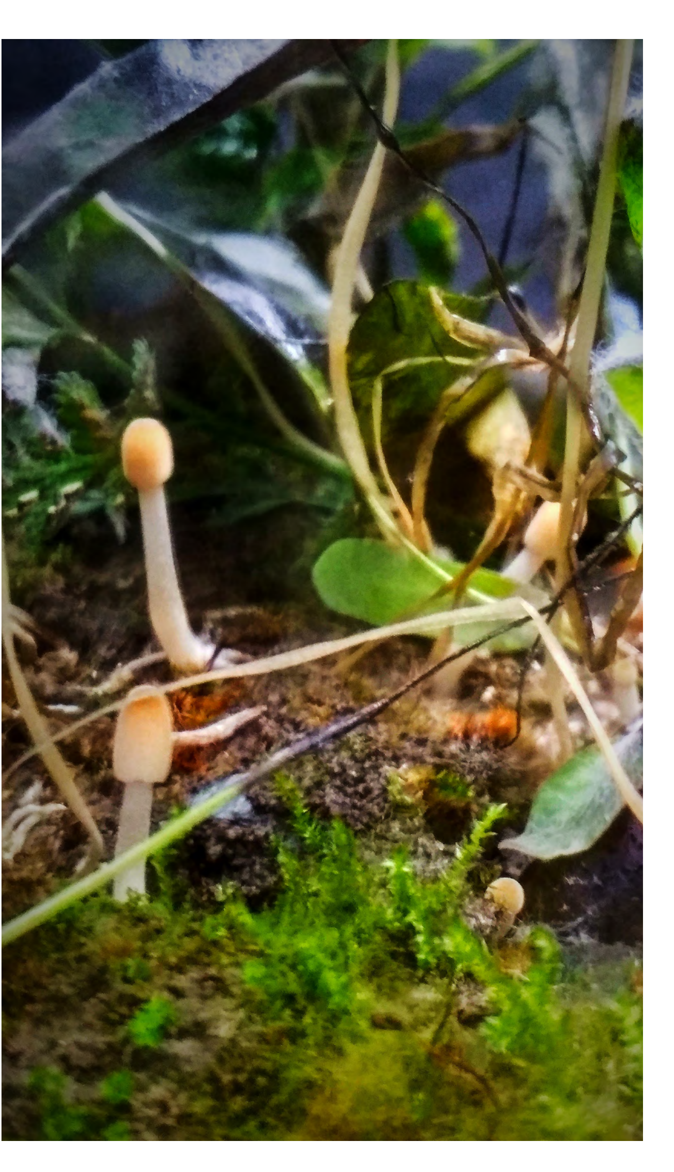
Visto esto, podemos proceder a plantar dos, tres o cuatro plantas distintas. Colocaremos una capa de tierra ligeramente húmeda, libre de piedras y tamizada de un modo grosero. La comprimiremos un poco. Luego, colocaremos las plantas.

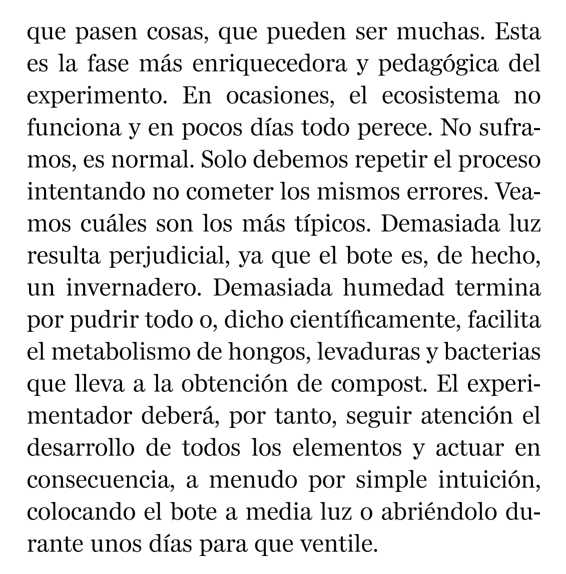
A partir de aquí, empieza una fase más artística que científica. El experimentador deberá inspirarse en el mundo natural para reproducir un paisaje a escala que emule la realidad. Pequeños troncos secos, alguna piedra bonita que le confiera un aire rocoso, musgo en los rincones, algún liquen... Luego, terminada la composición floral, por decirlo de algún modo, rociaremos el interior del bote con un poco de agua no clorada y lo cerraremos... para siempre. Bueno, todavía no.

No nos precipitemos y recapitulemos lo hecho hasta aquí desde el punto de vista biológico. A poco que analicemos el contenido de nuestro bote biosférico, veremos que en su interior ya existe una rica biodiversidad. Con todo lo que hemos puesto, ha venido una carga viva espectacular: un solo centímetro cúbico de tierra de bosque contiene una miríada de virus, bacterias, hongos y todo tipo de invertebrados, amén de levaduras, esporas varias y cientos de compuestos húmicos de notable complejidad. Todo ello, junto con las plantas superiores, helechos y musgos que hemos plantado, abasta casi el conjunto del árbol de la vida o, al menos, de los cinco reinos. Y todavía podemos hacer alguna cosa más. Buscando en el bosque, encontraremos diminutos ácaros, caracoles mínimos, arañas minúsculas y todo tipo de bichejos que podemos introducir en el bote, acrecentando así la complejidad del ecosistema y facilitando que los residuos metabólicos de unas especies se conviertan en los nutrientes de otras.


Recreación de un micropaisaje húmedo. Obsérvese que se han añadido rocas y madera muerta.

Ahora quizá sí que ya podemos sellar nuestra pequeña biosfera y esperar tranquilamente a





que pasen cosas, que pueden ser muchas. Esta es la fase más enriquecedora y pedagógica del experimento. En ocasiones, el ecosistema no funciona y en pocos días todo perece. No suframos, es normal. Solo debemos repetir el proceso intentando no cometer los mismos errores. Veamos cuáles son los más típicos. Demasiada luz resulta perjudicial, ya que el bote es, de hecho, un invernadero. Demasiada humedad termina por pudrir todo o, dicho científicamente, facilita el metabolismo de hongos, levaduras y bacterias que lleva a la obtención de compost. El experimentador deberá, por tanto, seguir atención el desarrollo de todos los elementos y actuar en consecuencia, a menudo por simple intuición, colocando el bote a media luz o abriéndolo durante unos días para que ventile.



Bote hermético, de unos pocos meses de edad (*arriba*). Tras varios meses de crecimiento, y solo durante unas semanas, aparecieron unos hongos bellísimos (*izquierda*).

Por suerte, también pasan cosas interesantísimas. En una ocasión pude observar el ciclo completo de desarrollo de un hongo. Fue espectacular. Durante unos días surgían pequeños y campanudos sombreros que crecían a una velocidad vertiginosa para iniciar un rapidísimo proceso de putrefacción veinticuatro horas después. También fue alucinante asistir a una plaga de minicaracolillos que colonizaron y se zamparon todo lo que encontraron en su camino. Mis alumnos del momento pudieron seguir el proceso a la perfección, preguntándonos todos por qué sucedían aquellos fenómenos y aprendiendo a captar la extraordinaria complejidad de la biosfera donde vivimos.

Marc Boada Ferrer
es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura científica. Marc Boada Ferrer en *IyC*, agosto de 2014.
Micorrizas: la simbiosis que conquistó la tierra firme. Marc-André Selosse en *IyC*, septiembre de 2019.
Los cuidadores de los suelos. Jérôme Cortet en *IyC*, abril de 2021.

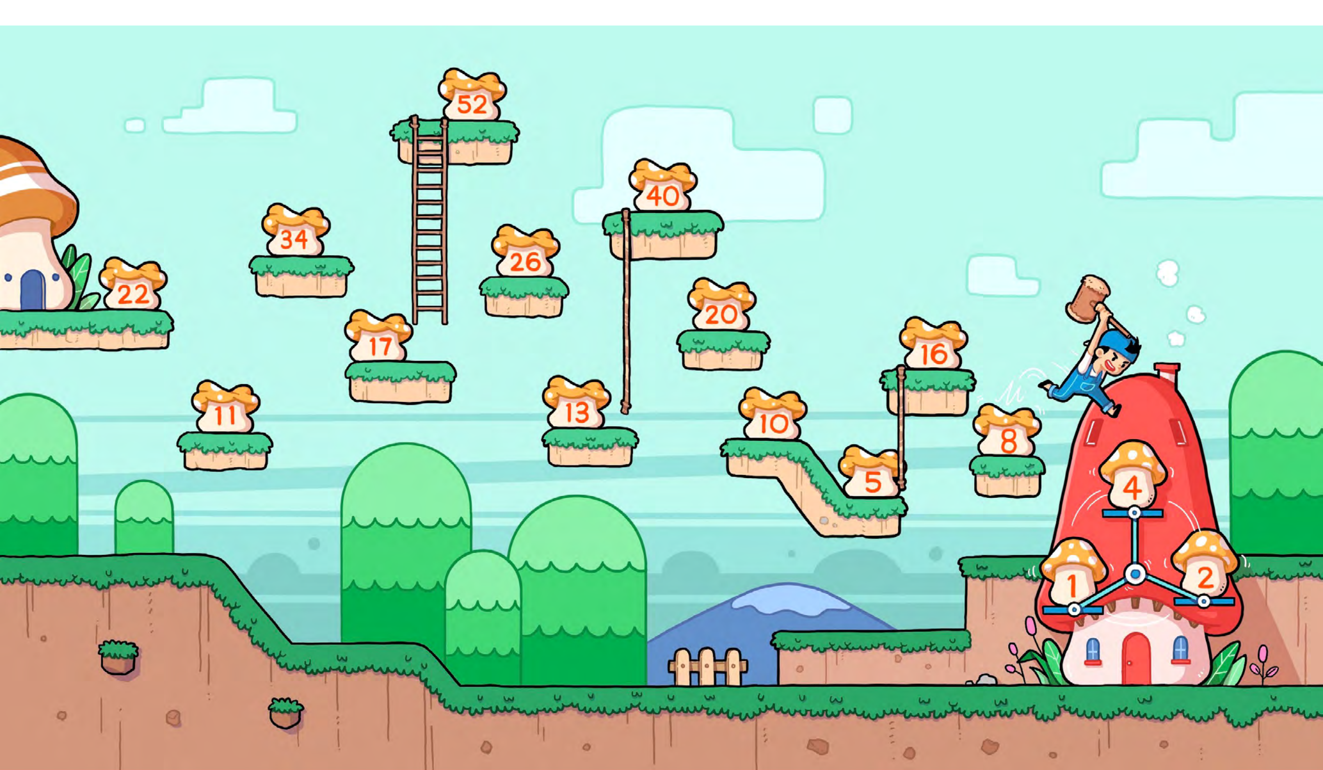
LA CONJETURA DE COLLATZ

Patrick Honner | A pesar de los recientes avances hacia la resolución de esta sencilla conjetura, aún no sabemos si algún número puede escapar de su bucle infinito

Esta columna viene con una advertencia: no intente resolver este problema matemático. Se sentirá tentado. El problema es fácil de enunciar, sencillo de entender y demasiado atractivo. Solo tiene que elegir un número cualquiera: si es par, divídalo por 2; si es impar, multiplíquelo por 3 y sume 1. Tome el número resultante y repita el proceso, una y otra vez. Si insiste, acabará entrando en un bucle... o, al menos, eso es lo que creemos.

Tomemos el 10, por ejemplo. Es un número par, así que lo dividimos por 2 y obtenemos 5. Como el 5 es impar, lo multiplicamos por 3 y sumamos 1. Ahora tenemos 16, que es par, de modo que lo dividimos por 2 y llegamos a 8. Volvemos a dividir por 2 para obtener 4, dividimos de nuevo para obtener 2, y una vez más para obtener 1. Como el 1 es impar, lo multiplicamos por 3 y sumamos 1. Entonces llegamos de nuevo a 4, y ya sabemos qué sucede a continuación: de 4 pasamos a 2, luego a 1, después a 4, y así sucesivamente. Estamos atrapados en un bucle.

O podemos probar con el 11: dado que es impar, lo multiplicamos por 3 y sumamos 1. Ahora tenemos 34, que es par, así que lo dividimos por 2 y obtenemos 17. Multiplicamos por 3 y sumamos 1, lo cual da 52. Dividimos por 2 para obtener 26, y una vez más hasta llegar a 13. Ahora multiplicamos por 3 y sumamos 1 para obtener 40, dividimos por 2 para obtener 20, luego 10 y



BIG MOUTH PARA *QUANTA MAGAZINE*

después 5. Multiplicamos por 3 y sumamos 1, lo que da 16, y dividimos por 2 para obtener 8, y luego 4, 2 y 1. Y de nuevo nos quedamos atascados en el bucle.

La célebre conjetura de Collatz afirma que, si partimos de cualquier número entero positivo, siempre acabaremos en ese bucle. Es probable que el lector ignore mi advertencia sobre no intentar resolverla: parece demasiado simple y sistemática como para escapar a nuestra comprensión. De hecho, sería difícil hallar un matemático que no haya jugado un poco con este problema.

Cuando lo descubrí en la escuela no fui capaz de ignorarlo. Mis amigos y yo nos pasamos días intercambiando emocionantes reflexiones que nunca parecían acercarnos a una respuesta. Y es que la conjetura de Collatz es célebre por un motivo: aunque todos los números que hemos probado terminan en el bucle, aún no estamos seguros de que eso ocurra siempre. Pese a toda la atención que ha recibido, sigue siendo tan solo una conjetura.

No obstante, se han hecho progresos. Uno de los mejores matemáticos del mundo ignoró todas las advertencias y se decidió a intentarlo, logrando el mayor avance de los últimos decenios. Veamos qué hace que este sencillo problema resulte tan complicado.

Para entender la conjetura de Collatz, podemos examinar la siguiente función:

$$f(n) = \begin{cases} n/2 & \text{si } n \text{ es par} \\ 3n + 1 & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Tal vez recuerde haber estudiado en el instituto las funciones definidas «a trozos»: la función anterior toma una entrada n y realiza una operación u otra dependiendo de si la entrada es par o impar. Esta función f implementa las reglas del procedimiento descrito al principio de la columna. Por ejemplo, $f(10) = 10/2 = 5$, puesto que 10 es par, y $f(5) = 3 \times 5 + 1 = 16$, dado que 5 es impar. La conjetura de Collatz también se conoce como conjetura $3n + 1$, a partir de la regla para las entradas impares.

La conjetura de Collatz se refiere a las «órbitas» de esa función f. Una órbita es lo que se obtiene si empezamos con un número y aplicamos una función de manera repetida, tomando cada resultado y usándolo como una nueva entrada de la función. Este proceso se conoce como «iterar» la función. Ya hemos comenzado a calcular la órbita de 10 bajo la función f, así que vamos a hallar los siguientes términos:

$$f(10) = 10/2 = 5,$$
$$f(5) = 3 \times 5 + 1 = 16,$$
$$f(16) = 16/2 = 8,$$
$$f(8) = 8/2 = 4.$$

Una forma conveniente de representar una órbita es mediante una secuencia con flechas. Por ejemplo, la órbita de 10 bajo f puede escribirse como

$$10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1 \to 4 \to 2 \to 1 \to \cdots$$

Al final, vemos que estamos atrapados en el bucle

$$1 \to 4 \to 2 \to 1 \to \cdots$$

Del mismo modo, la órbita de 11 bajo f puede representarse como

$$11 \to 34 \to 17 \to 52 \to 26 \to 13 \to 40 \to 20 \to$$
$$10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1 \to 4 \to \cdots$$

y terminamos otra vez en el mismo bucle. Si prueba unos cuantos ejemplos más, verá que la órbita siempre se estabiliza en el bucle $4 \to 2 \to 1 \to \ldots$ Los valores iniciales 9 y 19 son divertidos, y, si tiene unos minutos libres, pruebe con 27. Si hace bien los cálculos, llegará al bucle después de 111 pasos.

La conjetura de Collatz afirma que la órbita de cualquier número bajo f acaba llegando a 1. Y, aunque nadie lo ha demostrado, se ha verificado para todos los números menores que $2^{68} \approx 2{,}95 \times 10^{20}$. Así que si busca un contraejemplo, puede empezar por 300 trillones. (¡No diga que no le avisé!)

Es muy fácil comprobar que la conjetura de Collatz se cumple para cualquier número concreto: solo hay que calcular la órbita hasta llegar a 1. Pero para ver por qué resulta difícil demostrarla para cualquier número, analizaremos una función g un poco más sencilla:

$$g(n) = \begin{cases} n/2 & \text{si } n \text{ es par} \\ n + 1 & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

La función g es similar a f, pero a los números impares solo les suma 1, sin multiplicarlos primero por 3. Como g y f son funciones distin-

tas, los números tienen órbitas diferentes para cada una de ellas. Por ejemplo, las órbitas de 10 y 11 bajo g son

$$10 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \cdots$$
$$11 \rightarrow 12 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \cdots$$

Observemos que la órbita de 11 llega a 1 más rápido para g que para f. Y la de 27 también alcanza 1 mucho más deprisa bajo g:

$$27 \rightarrow 28 \rightarrow 14 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \cdots$$

Estos ejemplos muestran que, para g, las órbitas también parecen estabilizarse, pero en un bucle ligeramente más sencillo:

$$\cdots \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow \cdots$$

Cabe conjeturar que las órbitas bajo g siempre llegan a 1. Me referiré a esta afirmación como la conjetura de «Nollatz», aunque también podríamos llamarla conjetura $n + 1$. Es posible examinarla probando más órbitas, pero saber que algo es cierto para un conjunto de números (aunque sean 2^{68}) no constituye una prueba de que se cumpla para cualquier número. Por suerte, la conjetura de Nollatz se puede demostrar. Veamos cómo.

Para empezar, sabemos que la mitad de un número entero positivo es siempre menor que el propio número. Así que, si n es par y positivo, tendremos $g(n) = n/2 < n$. En otras palabras, cuando una órbita alcanza un número par, el siguiente número siempre será menor.

Ahora bien, si n es impar, entonces $g(n) = n + 1$, que es mayor que n. Pero como n es impar, $n + 1$ es par, y ya sabemos lo que ocurrirá a continuación: g dividirá $n + 1$ entre 2. Para n impar, la órbita adopta esta forma:

$$\cdots \rightarrow n \rightarrow n + 1 \rightarrow (n + 1)/2 \rightarrow \cdots$$

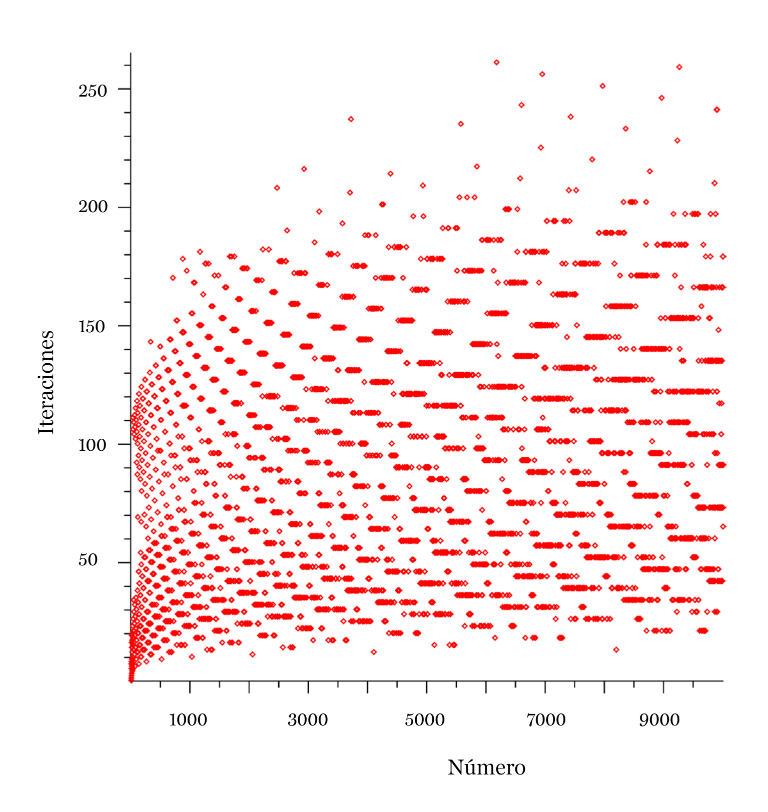
Observe que $(n + 1)/2 = n/2 + 1/2$. Como $n/2 < n$ y $1/2$ es pequeño, es probable que $n/2 + 1/2$ también sea menor que n. De hecho, es muy fácil demostrar que $n/2 + 1/2 < n$ es cierto siempre para $n > 1$.

Y eso quiere decir que, cuando una órbita bajo g alcanza un número impar mayor que 1, dos pasos después siempre tendremos un número menor. Ahora ya podemos esbozar una demostración de la conjetura de Nollatz: en cualquier punto de nuestra órbita, ya sea en un número par o impar, la secuencia siempre tenderá a ir hacia números más pequeños. La única excepción ocurrirá cuando alcancemos 1, al final de nuestro descenso. Pero, una vez que lleguemos a 1, estaremos atrapados en el bucle, tal y como habíamos conjeturado.

¿Podríamos usar un argumento similar para probar la conjetura de Collatz? Consideremos de nuevo nuestra función original:

$$f(n) = \begin{cases} n/2 & \text{si } n \text{ es par} \\ 3n + 1 & \text{si } n \text{ es impar} \end{cases}$$

Al igual que pasaba con g, al aplicar f a un número par, obtenemos uno más pequeño. Y



NÚMERO DE VECES que hay que aplicar la función de Collatz hasta llegar a 1, para todos los números entre 1 y 10.000.

CIRNE/WIKIMEDIA COMMONS

como ocurría con g, aplicar f a un número impar produce un número par, lo que significa que ya sabemos lo que nos espera después: f dividirá el nuevo número por 2. Este es el aspecto que tiene la órbita bajo f cuando n es impar:

$$\cdots \to n \to 3n + 1 \to (3n + 1)/2 \to \cdots$$

Pero aquí es donde el argumento se viene abajo. A diferencia de lo que sucedía en nuestro ejemplo anterior, este número es mayor que n:

$$(3n + 1)/2 = 3n/2 + 1/2,$$

y $3n/2 = 1{,}5n$, que siempre es mayor que n. La clave de nuestra demostración de la conjetura de Nollatz era que un número impar siempre acaba siendo más pequeño dos pasos después, pero eso no se cumple en el caso de Collatz. Así pues, nuestro argumento no funciona.

Si es usted como yo y mis amigos de la escuela, ahora quizás esté emocionado ante la posibilidad de probar que la conjetura de Collatz es falsa: después de todo, si la órbita crece más y más, ¿cómo podría llegar a 1? Pero este argumento exige pensar en lo que ocurre a continuación, y al hacerlo comprendemos por qué la conjetura de Collatz constituye un terreno tan resbaladizo: no podemos estar seguros de si $(3n + 1)/2$ es par o impar.

Sabemos que $3n + 1$ es par. Si, además, $3n + 1$ es divisible por 4, entonces $(3n + 1)/2$ también será par, y la órbita «bajará» hacia números más pequeños. Pero si $3n + 1$ no es divisible por 4, entonces $(3n + 1)/2$ es impar, y la órbita «subirá». En general, no podemos predecir cuál de esas dos cosas sucederá, de modo que nos hallamos en un callejón sin salida.

Pero ese planteamiento no es del todo inútil. Como la mitad de los enteros positivos son pares, hay un 50 por ciento de probabilidades de que $(3n + 1)/2$ sea par, lo cual hace que el siguiente paso en la órbita sea $(3n + 1)/4$. Para $n > 1$, este número es menor que n, así que la mitad de las veces un número impar debería hacerse más pequeño al cabo de dos pasos. También hay un 50 por ciento de posibilidades de que $(3n + 1)/4$ sea par, lo que significa que hay una probabilidad del 25 por ciento de que un número impar se reduzca a menos de la mitad de su valor inicial después de tres pasos. Y así sucesivamente. El resultado neto es que, en un cierto sentido estadístico, las órbitas de Collatz bajan cuando encuentran un número impar. Y como dichas órbitas siempre bajan para los números pares, eso sugiere que todas las secuencias de Collatz deben disminuir a largo plazo. Este argumento probabilístico es de sobra conocido, pero nadie ha sido capaz de ampliarlo para obtener una demostración completa de la conjetura.

Sin embargo, varios matemáticos han probado que la conjetura de Collatz es «casi siempre» cierta. En concreto, han demostrado que, en comparación con la cantidad de números que sabemos que conducen a 1, la cantidad de números sobre los que no estamos seguros es insignificante. En 1976, el matemático estonio-estadounidense Riho Terras demostró que, tras aplicar repetidamente la función de Collatz, casi todos los números acaban produciendo un número menor. Y, como ya hemos visto, demostrar que los números de la órbita se hacen sistemáticamente más pequeños es un camino para probar que terminan llegando a 1.

Y en 2019, Terence Tao, uno de los matemáticos más brillantes de hoy en día, mejoró ese resultado. Terras demostró que, para casi todos los números, la secuencia de Collatz de n acaba siendo menor que n. Mientras, Tao probó que, para casi todos los números, la secuencia de Collatz de n acaba siendo mucho más pequeña: menor que $n/2$, que $\sqrt{n}$, que $\ln n$ (el logaritmo natural de n), o incluso menor que toda $h(n)$, donde h es cualquier función que tienda a infinito, no importa cómo de despacio. Es decir, que podemos garantizar que la secuencia de Collatz de casi cualquier número se hace tan pequeña como queramos. En una charla sobre el problema, Tao sentenció que este resultado es «lo más que uno puede acercarse a [demostrar] la conjetura de Collatz sin llegar a resolverla».

Aun así, la conjetura seguirá atrayendo a matemáticos y aficionados. Así que coja un número, el que sea, y haga un intento. Pero está avisado: no se quede atrapado en un bucle sin fin.

Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.



Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia.

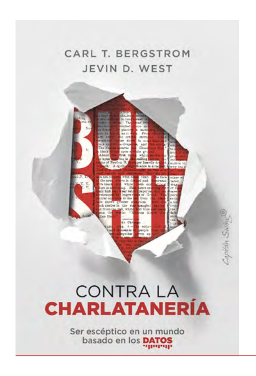


EN NUESTRO ARCHIVO

Un gran resultado matemático para un «problema peligroso». Kevin Hartnett en www.investigacionyciencia.es, 18 de diciembre de 2019.

CUANDO LOS DATOS DESINFORMAN

Cómo reconocer y desmontar la charlatanería y las falsas noticias cuando estamos sobreexpuestos a ellas



Bullshit: Contra la charlatanería
Carl T. Bergstrom y Jevin D. West
Capitán Swing, 2021
414 páginas

Una de las características que define a nuestra sociedad actual es su capacidad de generar una ingente cantidad de datos de forma continua (estimada globalmente en unos 12,6 teraoctetos [Tb] de información por segundo), así como las facilidades que tiene para usarlos, procesarlos y compartirlos de manera inmediata. Este volumen de macrodatos (*big data*) influye cada vez más en nuestro día a día y resulta clave para comprender cómo funciona nuestro mundo. A modo de ejemplo, es bastante probable que, aunque no seamos conscientes de ello, la canción que estamos escuchando, el producto que acabamos de comprar en Internet o la última entrevista de trabajo que hemos realizado vengan determinados por un algoritmo de inteligencia artificial cuyo resultado depende de los datos con los que ha sido entrenado.

Junto con esa información, han proliferado también los bulos, las noticias falsas y el *bullshit*, término inglés que —como apunta la traductora de la obra, Victoria Pradilla— no tiene un equivalente en español pero que se utiliza cuando se pretende «engañar de forma deliberada» pero no «mentir de forma deliberada».

La facilidad con la que los datos pueden manipularse, unida a la posibilidad de compartir información de manera instantánea mediante las redes sociales y los programas de mensajería, y a los cambios en nuestra forma de informarnos (cada vez leemos menos noticias y análisis detallados en la prensa y nos informamos mediante Twitter, Facebook o WhatsApp) han traído consigo una dificultad cada vez mayor para valorar la veracidad de la información que recibimos. Los bulos, noticias falsas y el *bullshit* han pasado de ser anécdotas con las que reírnos un rato a convertirse en una amenaza creciente que no solo afecta a nuestras relaciones personales y familiares, sino que también puede llegar a alterar el desarrollo de elecciones en países democráticos, generar conflictos diplomáticos, polarizar a sociedades enteras o aumentar la mortalidad de pandemias como la que estamos sufriendo en la actualidad.

Nos encontramos, pues, ante un problema de primer orden y necesitamos herramientas para poder afrontarlo. Herramientas como las que vamos a encontrar en este ensayo escrito por Carl T. Bergstrom y Jevin D. West, dos profesores universitarios y reconocidos expertos en la materia que llevan años impartiendo con notable éxito el curso *Calling bullshit* («Detectar el *bullshit*»), en el que enseñan a sus alumnos a identificar y refutar los bulos, las noticias falsas y el *bullshit*.

A lo largo de sus 11 capítulos, los autores realizan un exhaustivo análisis de todo lo que rodea a esta cuestión. Así, vamos a encontrar una descripción detallada sobre las causas, la propagación y las consecuencias del *bullshit*, el papel que desempeñan los medios de comunicación y las redes sociales en su difusión y la importancia que tiene la visualización de datos como herramienta fundamental para manipularlos deliberadamente y difundir *bullshit*. Esto último no es ninguna sorpresa dada la importancia que el sentido de la vista juega en nuestra interacción y comprensión del medio que nos rodea. Bergstrom y West también abordan temas como el sesgo de selección, la vulnerabilidad de la ciencia ante los efectos perniciosos del *bullshit* —seguro que muchos lectores de esta

reseña sabrán de qué les hablo si les menciono el sesgo de publicación— y, algo fundamental en un ensayo de esta naturaleza, las claves para poder identificarlo, señalarlo y refutarlo.

Los autores utilizan un lenguaje riguroso y en ocasiones algo técnico, pero, en líneas generales, accesible. Y no se andan con ambages ni medias tintas a la hora de denunciar e ilustrar la magnitud del problema. La amplia experiencia investigadora y docente de Bergstrom y West se nota a lo largo de todo el libro, pero cobra especial relevancia cuando presentan sus ejemplos. Estos están explicados de forma muy didáctica, algo a lo que sin duda contribuyen los numerosos e ilustrativos gráficos que acompañan al texto y el acertado uso que hacen de las analogías. Son estas una poderosa herramienta para comprobar que muchos de los mensajes que recibimos cuentan solo una parte —normalmente interesada y/o poco relevante— de un determinado hecho o acontecimiento.

Mención especial requieren también tanto el completo tratamiento que hacen los autores sobre la inteligencia artificial y su importancia en el contexto del *bullshit* como los capítulos dedicados a señalarlo y refutarlo, que me han parecido de lo mejor del libro. Este contiene también una prolija bibliografía que permitirá a los lectores interesados profundizar en los temas tratados en cada capítulo, si bien no incluye (o no son fáciles de localizar) las referencias de todos los estudios que se mencionan en el texto. Esto es algo muy común en los ensayos de esta naturaleza; si bien logra simplificar el cuerpo del texto, lo hace a costa de que a los lectores interesados les resulte muy difícil encontrar y consultar estos estudios para verificar o ampliar la información.

También he echado en falta un índice alfabético, que sería de gran utilidad para los lectores que quieran volver a consultar algún tema concreto. El que no se proporcionen las fuentes concretas de los datos mostrados en las distintas figuras del libro es también otra pequeña pega fácilmente subsanable en ediciones posteriores. Al igual que ocurre con los estudios que se mencionan (pero no se citan) en el texto principal, contar con estas referencias permitiría contrastar o ampliar la información proporcionada sin merma en la legibilidad e interés. Estas críticas menores no empañan en absoluto el encomiable esfuerzo que han realizado los autores para sintetizar un tema complejo y con muchas aristas en unas 400 páginas que, para mi sorpresa inicial, en numerosas ocasiones se leen de forma amena y entretenida.

Nos encontramos ante un problema de primer orden y necesitamos herramientas para poder afrontarlo

Resulta difícil quedarse con una única lección entre todas las que nos proporciona este libro. Pero si tuviera que elegir una, me quedaría con esto que nos cuentan los autores al final del libro: «Todos tenemos que estar un poco más alerta, ser un poco más reflexivos e ir con un poco más de cuidado cuando compartimos información. Y, de vez en cuando, tenemos que denunciar el *bullshit* que aparece ante nosotros».

Nos encontramos, pues, ante un libro muy actual y altamente recomendable. He disfrutado mucho leyéndolo y es una obra tan informativa como (durante su mayor parte) entretenida, algo que no se encuentra en todos los ensayos de esta naturaleza. Como persona curiosa y reflexiva que soy, me ha gustado en particular no solo que este ensayo me haya ilustrado sobre el *bullshit*, sino que me haya hecho reflexionar y cambiar algunas ideas preconcebidas que tenía sobre este problema. También ha refrescado y dado herramientas nuevas a mi escepticismo, algo que sin duda necesitamos fomentar en nuestra sociedad si queremos poder discernir no solo el grano de la paja, sino lo que es cierto de lo que no lo es. ¿Podremos lograrlo? Como diría Yoda, difícil tarea esta es, pero sin duda alguna que las herramientas que proporciona *Bullshit: Contra la charlatanería* nos ayudarán a conseguirlo.

Fernando T. Maestre
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio «Ramon Margalef», Universidad de Alicante